

На правах рукописи

Исаченко Роман Владимирович

СНИЖЕНИЕ РАЗМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВА В ЗАДАЧАХ ДЕКОДИРОВАНИЯ
СИГНАЛОВ

05.13.17 — Теоретические основы информатики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2021

Работа выполнена на Кафедре интеллектуальных систем Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский институт)».

Научный руководитель: **Стрижов Вадим Викторович**
доктор физико-математических наук, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, отдел интеллектуальных систем, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты: **Чуличков Алексей Иванович**
доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», профессор кафедры математического моделирования и информатики физического факультета.

Зайцев Алексей Алексеевич
кандидат физико-математических наук, Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий», руководитель лаборатории в Центре по научным и инженерным вычислительным технологиям для задач с большими массивами данных.

Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».**

Защита состоится **6 февраля 2020 года в 13:00** на заседании диссертационного совета Д 002.073.05 при Федеральном исследовательском центре «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН) по адресу: 119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 40.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного учреждения Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук и на сайте <http://www.frccsc.ru/>

Автореферат разослан **декабря 2021 года.**

И. о. ученого секретаря
диссертационного совета Д 002.073.05
д.т.н.

И. А. Матвеев

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В работе решается задача декодирования сигналов. Процесс декодирования заключается в восстановлении зависимости между двумя гетерогенными наборами данных. Модель предсказывает отклик на входной исходный сигнал. При построении модели возникает задача построения признакового пространства.

Исследуется проблема избыточного исходного описания данных. Исходное признаковое пространство является мультикоррелированным. При высокой мультикорреляции финальная прогностическая модель оказывается неустойчивой. Для построения простой, устойчивой модели применяются методы снижения размерности пространства (Motrenko: 2018, Chun: 2010, Mehmood: 2012) и выбора признаков (Katrutsa: 2017, Li: 2017).

В работе рассматривается задача с векторной целевой переменной. Пространство целевых сигналов обладает избыточной размерностью. Методы снижения размерности, не учитывающие зависимости в целевом пространстве, являются не адекватными. При предсказании векторной целевой переменной анализируется структура целевого пространства. Предложены методы, которые учитывают зависимости как в пространстве исходных объектов, так и в пространстве целевой переменной. Предлагается отобразить пространства исходных и целевых сигналов в скрытые подпространства меньшей размерности. Для построения оптимальной модели предлагаются методы согласования скрытых пространств (Wold: 1975, Rosipal: 2005, Eliseyev: 2017). Предложенные методы позволяют учесть регрессионную компоненту между исходным и целевым сигналами, а также авторегрессионную компоненту целевого сигнала.

Методы снижения размерности пространства понижают размерность исходного пространства объектов, и, как следствие, сложность модели существенно снижается (Tipping: 1999, Hotelling: 1992). Алгоритмы снижения размерности находят оптимальные комбинации исходных признаков. Если число таких комбинаций существенно меньше, чем число исходных признаков, то полученное представление снижает размерность. Цель снижения размерности — получение наиболее репрезентативных и информативных комбинаций признаков для решения задачи.

Выбор признаков является частным случаем снижения размерности пространства (Katrutsa: 2015, 2017). Найденные комбинации признаков являются подмножеством исходных признаков. Таким образом отсеиваются шумовые неинформативные признаки. Рассматриваются два типа методов выбора признаков (Li: 2017, Rodriguez-Lujan: 2010, Friedman: 2001). Первый тип методов не зависит от последующей прогностической модели. Признаки отбираются на основе свойств исходных пространств, а не на основе свойств модели. Второй тип методов отбирает признаки с учётом знания о прогностической модели.

После нахождения оптимального представления данных с помощью снижения размерности, ставится задача нахождения оптимальной метрики в скры-

том пространстве объектов (Wang: 2017, Davis: 2007, Kulis: 2012, Yang: 2006, Weinberger: 2009). В случае евклидова пространства естественным выбором метрики оказывается квадратичная норма. Задача метрического обучения заключается в нахождении оптимальной метрики, связывающей объекты.

В качестве прикладной задачи анализируется задача построения нейрокомпьютерного интерфейса (Wolpaw: 2000, Allison: 2007). Цель состоит в извлечении информации из сигналов мозговой активности (Nagel: 2018, Zhang: 2020, Chiarelli: 2018). В качестве исходных сигналов выступают сигналы электроэнцефалограммы или электрокортикограммы. Целевым сигналом является траектория движения конечности индивидуума. Задача модели построить адекватную и эффективную модель декодирования исходного сигнала в целевой сигнал. Пространство частотных характеристик мозговых сигналов и авторегрессионное пространство целевых сигналов являются чрезвычайно избыточными (Eliseyev: 2011, 2013). Построение модели без учёта имеющихся зависимостей приводит к неустойчивости модели.

В диссертации решается задача декодирования с векторной целевой переменной. Для построения оптимальной модели декодирования сигналов предлагаются методы выбора согласованных моделей с проекцией в скрытое пространство. Исходные и целевые сигналы проецируются в пространство существенно меньшей размерности. Для связи проекций исходного и целевого сигнала предлагаются методы согласования. Рассматриваются гетерогенные наборы сигналов, природа источников измерений различны. Рассматриваются как линейные методы декодирования, так и их нелинейные обобщения. Доказаны теоремы об оптимальности предложенных методов выбора моделей.

Цели работы.

1. Исследовать свойства решения задачи декодирования сигналов с векторной целевой переменной.
2. Предложить методы снижения размерности пространства, учитывающие зависимости как в пространстве исходных сигналов, так и в целевом пространстве.
3. Предложить процедуру выбора признаков для задачи декодирования сигналов.
4. Исследовать свойства линейных и нелинейных моделей для решения поставленной модели. Получить теоретические оценки оптимальности моделей.
5. Провести вычислительные эксперименты для проверки адекватности предложенных методов.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Исследована проблема снижения размерности сигналов в коррелированных пространствах высокой размерности. Предложены методы декодирования сигналов, учитывающие зависимости как в исходном, так и в целевом пространстве сигналов.

2. Доказаны теоремы об оптимальности предлагаемых методов декодирования сигналов. Предлагаемые методы выбирают согласованные модели в случае избыточной размерности описания данных.
3. Предложены методы выбора признаков, учитывающие зависимости как в исходном, так и в целевом пространстве. Предложенные методы доставляют устойчивые и адекватные решения в пространствах высокой размерности.
4. Предложены нелинейные методы согласования скрытых пространств для данных со сложноорганизованной целевой переменной. Предложен метод выбора наиболее релевантных параметров для оптимизации нелинейной модели. Исследованы свойства предлагаемого метода.
5. Предложен алгоритм метрического обучения для временных рядов с процедурой их выравнивания.
6. Предложен ряд моделей для прогнозирования гетерогенных наборов сигналов для задачи построения нейрокомпьютерных интерфейсов. Проведены вычислительные эксперименты, подтверждающие адекватность моделей.

Методы исследования. Для достижения поставленных целей используются линейные и нелинейные методы регрессионного анализа. Для анализа временных рядов используются классические авторегрессионные методы. Для извлечения признаков используются частотные характеристики временного ряда. Для построения скрытого пространства используются линейные методы снижения размерности пространства, их нелинейные модификации, а также нейросетевые методы. Для выбора признаков наряду с классическими методами, используются методы, основанные на решении задачи квадратичного программирования. Для построения метрического пространства используются методы условной выпуклой оптимизации.

Научная новизна. Предложены методы построения моделей декодирования сигналов, учитывающие структуры пространств исходных и целевых переменных. Предложены методы проекции сигналов в скрытое пространство, а также процедуры согласования образов. Предложены методы выбора признаков с помощью квадратичного программирования. Предложен метод выбора параметров нелинейной модели для оптимизации с помощью выбора признаков. Предложены методы построения оптимального метрического пространства для задачи анализа временных рядов.

Теоретическая значимость. Доказаны теоремы об оптимальности предлагаемых моделей декодирования сигналов. Доказаны теоремы о корректности рассматриваемых согласованных моделей проекций в скрытое пространство. Доказаны теоремы о достижении точки равновесия для предлагаемых методов выбора признаков.

Практическая значимость. Предложенные в работе методы предназначены для декодирования множества временных рядов сигналов электрокортикограмм, а также нестационарных временных рядов; выбора оптимальных частотных характеристик сигналов; выбора наиболее информативных параметров модели; классификации и кластеризации временных рядов физической активности.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность результатов подтверждена математическими доказательствами, экспериментальной проверкой результатов предлагаемых методов на реальных данных, публикациями результатов в рецензируемых научных изданиях, в том числе рекомендованных ВАК. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях.

1. Р. В. Исаченко. Метрическое обучение в задачах мультиклассовой классификации временных рядов. *Международная научная конференция «Ломоносов»*, 2016.
2. R. G. Neychev, A. P. Motrenko, R. V. Isachenko, A. S. Inyakin, and V. V. Strijov. Multimodal forecasting multiscale time series in internet of things. *Международная научная конференция «11th International Conference on Intelligent Data Processing: Theory and Applications»*, 2016.
3. Р. В. Исаченко, И. Н. Жариков, и А. М. Бочкарёв. Локальные модели для классификации объектов сложной структуры. *Всероссийская научная конференция «Математические методы распознавания образов»*, 2017.
4. R. V. Isachenko and V. V. Strijov. Dimensionality reduction for multicorrelated signal decoding with projections to latent space. *Международная научная конференция «12th International Conference on Intelligent Data Processing: Theory and Applications»*, 2018.
5. Р. В. Исаченко, В. В. Стрижов. Снижение размерности в задаче декодирования временных рядов. *Международная научная конференция «13th International Conference on Intelligent Data Processing: Theory and Applications»*, 2020.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 печатных изданиях, 5 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 6 глав, заключения, списка иллюстраций, списка таблиц, списка основных обозначений и списка литературы из **ВСТАВИТЬ ЧИСЛО** наименований. Основной текст занимает **ВСТАВИТЬ ЧИСЛО** страниц.

Личный вклад. Все приведенные результаты, кроме отдельно оговоренных случаев, получены диссертантом лично при научном руководстве д.ф.-м.н. В. В. Стрижова.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и методы исследования, обоснована научная новизна, теоретическая и практическая значимости полученных результатов.

В **главе 1** ставится общая задача декодирования временных рядов. Ставится задача построения оптимальной линейной регрессионной модели декодирования.

Пусть $\mathbb{X} \subset \mathbb{R}^n$ — пространство исходной переменной, $\mathbb{Y} \subset \mathbb{R}^r$ — пространство целевой переменной. Пусть задано множество объектов $\{(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)\}_{i=1}^m$, где $\mathbf{x}_i \in \mathbb{X}$ — исходный объект, $\mathbf{y}_i \in \mathbb{Y}$ — целевой объект.

Обозначим за $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ матрицу исходной переменной, за $\mathbf{Y} \in \mathbb{R}^{m \times k}$ матрицу целевой переменной:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_m]^\top = [\chi_1, \dots, \chi_n]; \quad \mathbf{Y} = [\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_m]^\top = [\nu_1, \dots, \nu_r].$$

Столбцы $\chi_j, j = 1, \dots, n$ матрицы \mathbf{X} являются признаками исходного объекта, столбцы $\nu_j, j = 1, \dots, r$ матрицы \mathbf{Y} являются целевыми векторами.

Предполагается, что между исходным объектом \mathbf{x} и целевым объектом \mathbf{y} существует зависимость. Требуется построить прогностическую модель $\mathbf{f} : \mathbb{X} \rightarrow \mathbb{Y}$ из пространства исходной переменной в пространство целевой переменной.

Задача восстановления регрессионной зависимости состоит в нахождении оптимальной модели \mathbf{f}^* по заданным матрицам \mathbf{X} и \mathbf{Y} . Под оптимальностью понимается нахождение такой модели, которая бы доставляла минимум некоторой функции ошибки \mathcal{L} :

$$\mathbf{f}^* = \arg \min_{\mathbf{f}} \mathcal{L}(\mathbf{f}, \mathbf{X}, \mathbf{Y}). \quad (1)$$

Задача поиска оптимальной модели является задачей функциональной оптимизации. Для сужения пространства поиска моделей будем рассматривать параметрические модели $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \Theta)$, где Θ — *параметры модели*. Таким образом между объектами \mathbf{x} и \mathbf{y} существует зависимость вида

$$\mathbf{y} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \Theta) + \varepsilon, \quad (2)$$

где \mathbf{f} — параметрическая прогностическая модель, Θ — параметры модели, $\varepsilon \in \mathbb{R}^m$ — вектор регрессионных остатков.

Задача (1) сводится к задаче поиска набора оптимальных параметров

$$\Theta^* = \arg \min_{\Theta} \mathcal{L}(\Theta, \mathbf{X}, \mathbf{Y}). \quad (3)$$

В диссертации рассматривается случай избыточной размерности пространств \mathbb{X} , \mathbb{Y} . В таком случае решение задачи (3) оказывается неустойчивым. Рассмотрим в качестве примера задачу восстановления линейной регрессии.

Предположим, что зависимость $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \Theta)$ линейная:

$$\mathbf{y} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \Theta) + \varepsilon = \Theta^\top \mathbf{x} + \varepsilon, \quad (4)$$

где $\Theta \in \mathbb{R}^{n \times r}$ — матрица параметров модели.

Оптимальные параметры Θ определяются минимизацией функции ошибки $\mathcal{L}(\Theta, \mathbf{X}, \mathbf{Y})$. При решении задачи линейной регрессии в качестве такой функции ошибки рассматривается квадратичная функция потерь:

$$\mathcal{L}(\Theta, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \left\| \begin{matrix} \mathbf{Y} \\ m \times r \end{matrix} - \begin{matrix} \mathbf{X} \\ m \times n \end{matrix} \cdot \begin{matrix} \Theta \\ r \times n \end{matrix} \right\|_2^2 \rightarrow \min_{\Theta}. \quad (5)$$

Решением (5) является следующая матрица:

$$\Theta = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}.$$

Наличие линейной зависимости между столбцами матрицы \mathbf{X} приводит к неустойчивому решению задачи оптимизации (5). Если существует вектор $\alpha \neq \mathbf{0}_n$ такой, что $\mathbf{X}\alpha = \mathbf{0}_m$, то добавление α к любому столбцу матрицы Θ не меняет значение функции потерь $\mathcal{L}(\Theta, \mathbf{X}, \mathbf{Y})$. В этом случае матрица $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ близка к сингулярной и не обратима. Чтобы избежать сильной линейной зависимости между признаками, в данной работе исследуются методы снижения размерности и выбора признаков.

Задача декодирования сигналов состоит в восстановлении регрессионной зависимости (1) между наборами гетерогенных сигналов.

Пусть имеется два множества временных рядов $\mathcal{S}_x = \{\mathbf{s}_x^i\}_{i=1}^m$ и $\mathcal{S}_y = \{\mathbf{s}_y^i\}_{i=1}^r$, состоящие из m и r временных рядов соответственно. Первое множество \mathcal{S}_x является множеством временных рядов m исходных сигналов. Второе множество \mathcal{S}_y является множеством временных рядов r целевых сигналов. Каждый временной ряд $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_T)$ является последовательностью измерений некоторой величины в течение времени.

Определение 1. *Временное представление* $\mathbf{x}_t = ([\mathbf{s}_x^1]_t, \dots, [\mathbf{s}_x^m]_t) \in \mathbb{R}^m$ состоит из измерений временных рядов исходных сигналов в момент времени t . Аналогично временное представление $\mathbf{y}_t = ([\mathbf{s}_y^1]_t, \dots, [\mathbf{s}_y^r]_t) \in \mathbb{R}^r$ состоит из измерений временных рядов целевых сигналов в момент времени t .

Определение 2. Определим *представление предыстории* длины h для момента времени t множества временных рядов исходных сигналов \mathcal{S}_x как совокупность представлений $\mathbf{X}_{t,h} = [\mathbf{x}_{t-h+1}, \dots, \mathbf{x}_t]^T \in \mathbb{R}^{h \times m}$. Аналогично определим представление предыстории длины h для момента времени t множества временных рядов целевых сигналов \mathcal{S}_y как совокупность представлений $\mathbf{Y}_{t,h} = [\mathbf{y}_{t-h+1}, \dots, \mathbf{y}_t]^T \in \mathbb{R}^{h \times r}$.

Определение 3. Определим *представление горизонта прогнозирования* длины p для момента времени t множества временных рядов исходных сигналов \mathcal{S}_x как совокупность представлений $\mathbf{X}_{t,p} = [\mathbf{x}_{t+1}, \dots, \mathbf{x}_{t+p}]^T \in \mathbb{R}^{p \times m}$. Аналогично определим представление горизонта прогнозирования длины p для момента времени t множества временных рядов целевых сигналов \mathcal{S}_y как совокупность представлений $\mathbf{Y}_{t,p} = [\mathbf{y}_{t+1}, \dots, \mathbf{y}_{t+p}]^T \in \mathbb{R}^{p \times r}$.

Задача авторегрессионного декодирования состоит в построении прогностической модели \mathbf{f}^{AR} , дающий прогноз представления горизонта прогнозирования множества временных рядов по представлению предыстории прогнозирования того же множества временных рядов.

Определение 4. Прогностическая модель $\mathbf{f}_x^{\text{AR}} : \mathbb{R}^{h \times m} \rightarrow \mathbb{R}^{p \times m}$ является *авторегрессионной моделью*, которая по представлению предыстории $\mathbf{X}_{t,h}$ множества временных рядов исходных сигналов \mathcal{S}_x предсказывает представление горизонта прогнозирования $\mathbf{X}_{t,p}$ множества временных рядов исходных сигналов \mathcal{S}_x . Аналогично вводится прогностическая модель $\mathbf{f}_y^{\text{AR}} : \mathbb{R}^{h \times r} \rightarrow \mathbb{R}^{p \times r}$ для множества целевых сигналов \mathcal{S}_y .

Определение 5. Определим задачу *регрессионного декодирования* как задачу построения прогностической модели $\mathbf{f}_{xy}^{\text{R}} : \mathbb{R}^{h \times m} \rightarrow \mathbb{R}^{p \times r}$, которая по представлению предыстории $\mathbf{X}_{t,h}$ множества временных рядов исходных сигналов \mathcal{S}_x предсказывает представление горизонта прогнозирования $\mathbf{Y}_{t,p}$ множества временных рядов целевых сигналов \mathcal{S}_y .

Отличие регрессионного декодирования от авторегрессионного декодирования состоит в том, что в случае регрессионного декодирования представление предыстории и представление горизонта прогнозирования получены из временных рядов разных пространств. Пространства исходных и целевых сигналов могут являться существенно гетерогенными и обладать разными свойствами.

Определение 6. Общая *задача декодирования* состоит в построении прогностической модели $\mathbf{f}_{xy} : \mathbb{R}^{h_x \times m} \times \mathbb{R}^{h_y \times r} \rightarrow \mathbb{R}^{p \times r}$, которая по представлениям предыстории \mathbf{X}_{t,h_x} и \mathbf{Y}_{t,h_y} временных рядов исходных и целевых сигналов предсказывает представление горизонта прогнозирования $\mathbf{Y}_{t,r}$ временных рядов целевых сигналов.

Задача декодирования временных рядов декомпозируется на следующие подзадачи.

- Порождение признакового пространства. Данный этап включает в себя процедуру извлечения признаков из исходных значений сигналов. Процедура порождения признакового пространства может быть основана на экспертных знаниях или же являться моделью машинного обучения.
- Снижение размерности пространства или выбор признаков. Исходные временные ряды, а также порожденное признаковое пространство оказывается избыточным, что приводит к избыточности и неустойчивости модели.
- Построение модели. После нахождения оптимального низкоразмерного представления исходных данных ставится задача выбора оптимальной модели декодирования.

Методы снижения размерности позволяют найти низкоразмерное представление исходных данных. При этом метод снижения размерности может учитывать как зависимости в исходном объекте \mathbf{x} , так и в целевом объекте \mathbf{y} .

Метод главных компонент для задачи декодирования. Метод главных компонент (principal component analysis, PCA) находит низкоразмерное

представление матрицы $\mathbf{X} = \mathbf{TP}^\top$, такое что новое представление $\mathbf{T} \in \mathbb{R}^{m \times l}$ содержит максимальную долю дисперсии исходной матрицы. При этом матрица отображения $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{n \times l}$ является ортогональной ($\mathbf{P}^\top \mathbf{P} = \mathbf{I}$) и содержит правые собственные вектора матрицы ковариаций $\mathbf{X}^\top \mathbf{X}$.

После нахождения матрицы отображения \mathbf{P} задача (5) принимает вид

$$\mathcal{L}(\mathbf{B}, \mathbf{T}, \mathbf{Y}) = \left\| \begin{matrix} \mathbf{Y} & \mathbf{T} \cdot \mathbf{B} \\ m \times r & m \times l \quad l \times r \end{matrix} \right\|_2^2 \rightarrow \min_{\mathbf{B}}. \quad (6)$$

Модель прогнозирования (4) в случае снижения размерности с помощью PCA принимает вид:

$$\mathbf{y} = \mathbf{Bt} + \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{BPx} + \boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\Theta x} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad \text{где } \boldsymbol{\Theta} = \mathbf{BP}. \quad (7)$$

Метод частичных наименьших квадратов для задачи декодирования. Основным недостатком метода PCA является отсутствие учёта взаимосвязи между исходными признаками \mathbf{x}_j и целевыми векторами \mathbf{y}_j . Метод частичных наименьших квадратов (partial least squares, PLS) (Wold: 1975, 1982, Brereton: 2014, Rosipal: 2005) проецирует матрицу объектов \mathbf{X} и матрицу ответов \mathbf{Y} в скрытое пространство малой размерностью l ($l < n$). Метод PLS находит в скрытом пространстве матрицы $\mathbf{T}, \mathbf{U} \in \mathbb{R}^{m \times l}$, которые лучше всего описывают исходные матрицы \mathbf{X} и \mathbf{Y} . При этом PLS максимизирует ковариацию между столбцами матриц \mathbf{T} и \mathbf{U} соответственно.

Матрица исходных объектов \mathbf{X} и матрица целевых объектов \mathbf{Y} проецируются на скрытое пространство следующим образом:

$$\mathbf{X}_{m \times n} = \mathbf{T}_{m \times l} \cdot \mathbf{P}_{l \times n}^\top + \mathbf{E}_x_{m \times n} = \sum_{k=1}^l \boldsymbol{\tau}_k \cdot \mathbf{p}_k^\top + \mathbf{E}_x_{m \times n}, \quad (8)$$

$$\mathbf{Y}_{m \times r} = \mathbf{U}_{m \times l} \cdot \mathbf{Q}_{l \times r}^\top + \mathbf{E}_y_{m \times r} = \sum_{k=1}^l \boldsymbol{\nu}_k \cdot \mathbf{q}_k^\top + \mathbf{E}_y_{m \times r}. \quad (9)$$

Здесь \mathbf{T} и \mathbf{U} — образы исходных матриц в скрытом пространстве, причём столбцы матрицы \mathbf{T} ортогональны; \mathbf{P} и \mathbf{Q} — матрицы перехода; \mathbf{E}_x и \mathbf{E}_y — матрицы остатков. Метод PLS максимизирует линейную зависимость между столбцами матриц \mathbf{T} и \mathbf{U}

$$\mathbf{U} \approx \mathbf{TB}, \quad \mathbf{B} = \text{diag}(\beta_k), \quad \beta_k = \boldsymbol{\nu}_k^\top \boldsymbol{\tau}_k / (\boldsymbol{\tau}_k^\top \boldsymbol{\tau}_k),$$

где $\{\boldsymbol{\tau}\}_{i=1}^l$, $\{\boldsymbol{\nu}\}_{i=1}^l$ — столбцы матриц \mathbf{T} и \mathbf{U} соответственно.

Метод решает следующую оптимизационную задачу:

$$\max_{\|\mathbf{p}\|_2=\|\mathbf{q}\|_2=1} [\text{cov}(\mathbf{Xp}, \mathbf{Yq})^2] = \max_{\mathbf{p}, \mathbf{q}} \frac{\mathbf{p}^\top \mathbf{X}^\top \mathbf{Y} \mathbf{q}}{\sqrt{\mathbf{p}^\top \mathbf{p}} \sqrt{\mathbf{q}^\top \mathbf{q}}}. \quad (10)$$

Канонический анализ корреляций для задачи декодирования. Оптимизационная задача канонического корреляционного анализа (canonical correlation analysis, CCA) (Hotelling: 1992, Anderson: 1962) похожа на оптимизационную задачу PLS (10) с той лишь разницей, что вместо максимизации ковариации CCA максимизирует корреляцию:

$$\max_{\|\mathbf{p}\|_2=\|\mathbf{q}\|_2=1} [\text{corr}(\mathbf{X}\mathbf{p}, \mathbf{Y}\mathbf{q})^2] = \max_{\mathbf{p}, \mathbf{q}} \frac{\mathbf{p}^\top \mathbf{X}^\top \mathbf{Y} \mathbf{q}}{\sqrt{\mathbf{p}^\top \mathbf{X}^\top \mathbf{X} \mathbf{p}} \sqrt{\mathbf{q}^\top \mathbf{Y}^\top \mathbf{Y} \mathbf{q}}}. \quad (11)$$

В работе (Andrew: 2013) впервые было предложено обобщение метода CCA, работающего с нейросетями. Предложенный метод DeepCCA максимизирует корреляцию между представлениями, полученными на выходе нейросети:

$$\begin{aligned} \max_{\|\mathbf{p}\|_2=\|\mathbf{q}\|_2=1} [\text{corr}(\mathbf{g}_x(\mathbf{X}, \mathbf{W}_x) \cdot \mathbf{p}, \mathbf{g}_y(\mathbf{Y}, \mathbf{W}_y) \cdot \mathbf{q})^2] = \\ = \max_{\mathbf{p}, \mathbf{q}} \frac{\mathbf{p}^\top \mathbf{g}_x(\mathbf{X}, \mathbf{W}_x)^\top \mathbf{g}_y(\mathbf{Y}, \mathbf{W}_y) \mathbf{q}}{\sqrt{\mathbf{p}^\top \mathbf{g}_x(\mathbf{X}, \mathbf{W}_x)^\top \mathbf{g}_x(\mathbf{X}, \mathbf{W}_x) \mathbf{p}} \sqrt{\mathbf{q}^\top \mathbf{g}_y(\mathbf{Y}, \mathbf{W}_y)^\top \mathbf{g}_y(\mathbf{Y}, \mathbf{W}_y) \mathbf{q}}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь $\mathbf{g}_x(\mathbf{X}, \mathbf{W}_x)$ и $\mathbf{g}_y(\mathbf{Y}, \mathbf{W}_y)$ — нелинейные проекции исходных и целевых объектов. С использованием нейросетевых функций модель декодирования способна учитывать существенно нелинейные зависимости как в исходном пространстве, так и в целевом пространстве.

Глава 2. Задача построения согласованных моделей декодирования

В главе 2 приводится формальная постановка задачи построения согласованных моделей декодирования. Вводятся понятия скрытого пространства и процедуры согласования образов. Доказываются теоремы о выборе оптимальной модели декодирования.

Предположение 1. Рассмотрим случай, когда пространства \mathbb{X} и \mathbb{Y} имеют избыточную размерность. Это означает, что объекты \mathbf{x} и \mathbf{y} принадлежат некоторым многообразиям низкой размерности. В простейшем случае такие многообразия могут являться вложениями или линейными подпространствами.

Определение 7. Назовём пространство $\mathbb{T} \subset \mathbb{R}^l$ *скрытым пространством* для пространства $\mathbb{X} \subset \mathbb{R}^n$ ($l \leq n$), если существуют функция $\varphi_x : \mathbb{X} \rightarrow \mathbb{T}$ и функция $\psi_x : \mathbb{T} \rightarrow \mathbb{X}$ такие что

$$\text{для любого } \mathbf{x} \in \mathbb{X} \quad \text{существует } \mathbf{t} \in \mathbb{T} : \psi_x(\varphi_x(\mathbf{x})) = \psi_x(\mathbf{t}) = \mathbf{x}.$$

Функцию $\varphi_x(\mathbf{x})$ назовём *функцией кодирования* объекта \mathbf{x} , функцию $\psi_x(\mathbf{t})$ назовём *функцией декодирования*.

Аналогично введём определение *скрытого пространства* $\mathbb{U} \subset \mathbb{R}^s$ для целевого пространства \mathbb{Y} , *функции кодирования* $\varphi_y : \mathbb{Y} \rightarrow \mathbb{U}$ и *декодирования* $\psi_y : \mathbb{U} \rightarrow \mathbb{Y}$ такие что

$$\text{для любого } \mathbf{y} \in \mathbb{Y} \quad \text{существует } \mathbf{u} \in \mathbb{U} : \psi_y(\varphi_y(\mathbf{y})) = \psi_y(\mathbf{u}) = \mathbf{y}.$$

Образы матрицы исходных объектов \mathbf{X} и матрицы целевых объектов \mathbf{Y} в скрытых пространствах \mathbb{T} и \mathbb{U} имеют вид

$$\begin{aligned}\mathbf{T} &= \varphi_{\mathbf{x}}(\mathbf{X}) = [\mathbf{t}_1, \dots, \mathbf{t}_m]^\top = [\boldsymbol{\tau}_1, \dots, \boldsymbol{\tau}_l], \\ \mathbf{U} &= \varphi_{\mathbf{y}}(\mathbf{Y}) = [\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_m]^\top = [\boldsymbol{\nu}_1, \dots, \boldsymbol{\nu}_s].\end{aligned}$$

Здесь строки $\{\mathbf{t}_i\}_{i=1}^m$ матрицы \mathbf{T} и строки $\{\mathbf{u}_i\}_{i=1}^m$ матрицы \mathbf{U} являются образами исходных объектов $\{\mathbf{x}_i\}_{i=1}^m$ и целевых объектов $\{\mathbf{y}_i\}_{i=1}^m$. Столбцы $\{\boldsymbol{\tau}_j\}_{j=1}^l$ матрицы \mathbf{T} и столбцы $\{\boldsymbol{\nu}_j\}_{j=1}^s$ матрицы \mathbf{U} являются скрытыми векторами.

Определение 8. Будем говорить, что скрытые пространства \mathbb{T} и \mathbb{U} являются *согласованными*, если существует *функция связи* $\mathbf{h} : \mathbb{T} \rightarrow \mathbb{U}$, такая что

$$\text{для любого } \mathbf{u} \in \mathbb{U} \quad \text{существует } \mathbf{t} \in \mathbb{T} : \mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{t}).$$

Предположение 2. Предположим, что в задаче прогнозирования (1) пространства \mathbb{T} и \mathbb{U} являются скрытыми для пространств \mathbb{X} и \mathbb{Y} соответственно. Предположим также, что для данных скрытых пространств \mathbb{T} и \mathbb{U} существует функция связи $\mathbf{h} : \mathbb{T} \rightarrow \mathbb{U}$. Тогда выполнено

$$\text{для любого } \mathbf{y} \in \mathbb{Y} \quad \text{существует } \mathbf{x} \in \mathbb{X} : \mathbf{y} = \boldsymbol{\psi}_{\mathbf{y}}(\mathbf{u}) = \boldsymbol{\psi}_{\mathbf{y}}(\mathbf{h}(\mathbf{t})) = \boldsymbol{\psi}_{\mathbf{y}}(\mathbf{h}(\varphi_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}))),$$

и общая схема задачи поиска согласованной модели декодирования принимает вид следующей коммутативной диаграммы:

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{X} \subset \mathbb{R}^n & \xrightarrow{\mathbf{f}} & \mathbb{Y} \subset \mathbb{R}^r \\ \varphi_{\mathbf{x}} \updownarrow \psi_{\mathbf{x}} & & \psi_{\mathbf{y}} \updownarrow \varphi_{\mathbf{y}} \\ \mathbb{T} \subset \mathbb{R}^\ell & \xrightarrow{\mathbf{h}} & \mathbb{U} \subset \mathbb{R}^s \end{array} \quad (13)$$

Определение 9. Согласно диаграмме (13), определим *согласованную* модель декодирования $\mathbf{f} : \mathbb{X} \rightarrow \mathbb{Y}$ как суперпозицию

$$\mathbf{f} = \boldsymbol{\psi}_{\mathbf{y}} \circ \mathbf{h} \circ \varphi_{\mathbf{x}}. \quad (14)$$

Таким образом задача прогнозирования (1) сводится к поиску согласованной модели декодирования (14). Для поиска оптимальных параметров функций кодирования $\varphi_{\mathbf{x}}$ и $\varphi_{\mathbf{y}}$, декодирования $\psi_{\mathbf{x}}$ и $\psi_{\mathbf{y}}$, а также функции связи \mathbf{h} ставится задача максимизации *функции согласования скрытых векторов*

$$g : \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}, \quad g(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\nu}) \rightarrow \max_{\varphi_{\mathbf{x}}, \varphi_{\mathbf{y}}, \mathbf{h}}.$$

Каждая пара скрытых векторов $\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\nu}$ ищется последовательно.

Сформулируем примеры методов снижения размерности пространства, в терминах задачи построения согласованной модели декодирования.

Метод главных компонент. Функции кодирования $\varphi_{\mathbf{x}} : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^l$ и декодирования $\psi_{\mathbf{x}} : \mathbb{R}^l \rightarrow \mathbb{R}^m$ имеют вид

$$\varphi_{\mathbf{x}}(\mathbf{X}) = \underset{n \times m}{\mathbf{X}} \cdot \underset{m \times l}{\mathbf{P}}^{\top}, \quad \psi_{\mathbf{x}}(\mathbf{T}) = \underset{n \times l}{\mathbf{T}} \cdot \underset{l \times m}{\mathbf{P}},$$

где $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_l]$. Здесь матрица \mathbf{P} является ортогональной матрицей, то есть $\mathbf{P}^{-1} = \mathbf{P}^{\top}$.

Скрытые вектора $\boldsymbol{\tau}$ строятся так, чтобы выборочная дисперсия столбцов проекций матрицы \mathbf{X} была максимальной:

$$\mathbf{p} = \arg \max_{\|\mathbf{p}\|_2=1} g(\boldsymbol{\tau}) = \arg \max_{\|\mathbf{p}\|_2=1} [\text{var}(\boldsymbol{\tau})] = \arg \max_{\|\mathbf{p}\|_2=1} [\text{var}(\mathbf{X}\mathbf{p})],$$

где $\text{var}(\boldsymbol{\tau})$ — выборочная дисперсия.

Метод PCA не согласует исходные переменные и целевые переменные. А именно метод PCA не находит функции кодирования $\varphi_{\mathbf{y}}$ и декодирования $\psi_{\mathbf{y}}$, а также функцию связи \mathbf{h} . При этом функция согласования скрытых векторов $g(\boldsymbol{\tau})$ зависит только от одного аргумента. Из-за этого зависимости в обоих пространствах не учитываются.

Метод частичных наименьших квадратов и канонический анализ корреляций. В методах PLS и CCA функции кодирования и декодирования имеют вид

$$\begin{aligned} \varphi_{\mathbf{x}}(\mathbf{X}) &= \mathbf{X}\mathbf{W}, & \varphi_{\mathbf{y}}(\mathbf{Y}) &= \mathbf{Y}\mathbf{C}, \\ \psi_{\mathbf{x}}(\mathbf{T}) &= \mathbf{T}\mathbf{P}^{\top}, & \psi_{\mathbf{y}}(\mathbf{U}) &= \mathbf{U}\mathbf{Q}^{\top}. \end{aligned}$$

Функция связи \mathbf{h} имеет вид линейной модели, связывающей образы проекций в скрытом пространстве $\mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{t}) = \mathbf{B}^{\top}\mathbf{t}$. В данном случае схема декодирования (13) принимает вид следующей коммутативной диаграммы.

$$\begin{array}{ccc} \mathbf{X} \subset \mathbb{R}^n & \xrightarrow{\mathbf{f}} & \mathbf{Y} \subset \mathbb{R}^r \\ \mathbf{W} \left(\begin{array}{c} \uparrow \\ \downarrow \end{array} \right) \mathbf{P} & & \mathbf{Q} \left(\begin{array}{c} \uparrow \\ \downarrow \end{array} \right) \mathbf{C} \\ \mathbf{T} \subset \mathbb{R}^{\ell} & \xrightarrow{\mathbf{B}} & \mathbf{U} \subset \mathbb{R}^s \end{array}$$

Различие между методами PLS и CCA заключается в виде функции согласования g . Для метода PLS функция согласования скрытых векторов имеет вид $g(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\nu}) = \text{cov}(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\nu})$, а для метода CCA: $g(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\nu}) = \text{corr}(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\nu})$.

Нелинейный канонический анализ корреляций. Помимо линейных моделей декодирования рассматриваются нелинейные методы. В данном случае

функции кодирования и декодирования являются нелинейными нейросетями вида

$$\begin{aligned}\mathbf{T} &= \varphi_{\mathbf{x}}(\mathbf{X}) = \mathbf{W}_{\mathbf{x}}^L \sigma(\dots \sigma(\mathbf{W}_{\mathbf{x}}^2 \sigma(\mathbf{X} \mathbf{W}_{\mathbf{x}}^1)) \dots), \\ \mathbf{U} &= \varphi_{\mathbf{y}}(\mathbf{Y}) = \mathbf{W}_{\mathbf{y}}^L \sigma(\dots \sigma(\mathbf{W}_{\mathbf{y}}^2 \sigma(\mathbf{Y} \mathbf{W}_{\mathbf{y}}^1)) \dots), \\ \mathbf{X} &= \psi_{\mathbf{x}}(\mathbf{T}) = \mathbf{W}_{\mathbf{t}}^L \sigma(\dots \sigma(\mathbf{W}_{\mathbf{t}}^2 \sigma(\mathbf{T} \mathbf{W}_{\mathbf{t}}^1)) \dots), \\ \mathbf{Y} &= \psi_{\mathbf{y}}(\mathbf{U}) = \mathbf{W}_{\mathbf{u}}^L \sigma(\dots \sigma(\mathbf{W}_{\mathbf{u}}^2 \sigma(\mathbf{U} \mathbf{W}_{\mathbf{u}}^1)) \dots).\end{aligned}$$

Каждая нейросеть является суперпозицией последовательных умножений на матрицы параметров и применения поэлементных функций активаций.

Требуется найти такие параметры, при которых функция согласования g достигает своего максимума:

$$g(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\nu}) \rightarrow \max_{\mathbf{W}}, \quad (15)$$

где $\mathbf{W} = \{\mathbf{W}_{\mathbf{x}}^i, \mathbf{W}_{\mathbf{y}}^i, \mathbf{W}_{\mathbf{t}}^i, \mathbf{W}_{\mathbf{u}}^i\}_{i=1}^L$.

Процесс согласования заключается в максимизации функции согласования $g(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\nu})$ по параметрам нейросетей. В работе (Andrew: 2013) рассматривается частный случай задачи (15). При использовании в качестве функции согласования корреляции между проекциями $g(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\nu}) = \text{corr}(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\nu})$ частная производная функции согласования по первому аргументу принимает вид

$$\frac{\partial g(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\nu})}{\partial \boldsymbol{\tau}} = \frac{1}{m-1} \left(\boldsymbol{\Sigma}_1^{-1/2} \mathbf{U} \mathbf{V}^T \boldsymbol{\Sigma}_2^{-1/2} \mathbf{U} - \boldsymbol{\Sigma}_1^{-1/2} \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V}^T \boldsymbol{\Sigma}_1^{-1/2} \right),$$

где $\mathbf{U}, \mathbf{D}, \mathbf{V} = \text{SVD}(\boldsymbol{\Sigma})$, $\boldsymbol{\Sigma} = \boldsymbol{\Sigma}_1^{-1/2} \boldsymbol{\Sigma}_{12} \boldsymbol{\Sigma}_2^{-1/2}$, $\boldsymbol{\Sigma}_1 = \frac{1}{m-1} \mathbf{T} \mathbf{T}^T$, $\boldsymbol{\Sigma}_2 = \frac{1}{m-1} \mathbf{U} \mathbf{U}^T$, $\boldsymbol{\Sigma}_{12} = \frac{1}{m-1} \mathbf{T} \mathbf{U}^T$. Аналогичное выражение имеет частная производная по второму аргументу. Полученное выражение для градиента позволяет построить эффективный алгоритм для решения задачи с использованием градиентных методов оптимизации.

Псевдокод метода регрессии PLS приведен в алгоритме 1. Алгоритм итеративно на каждом из l шагов вычисляет по одному столбцу $\boldsymbol{\tau}_k, \boldsymbol{\nu}_k, \mathbf{p}_k, \mathbf{q}_k$ матриц $\mathbf{T}, \mathbf{U}, \mathbf{P}, \mathbf{Q}$ соответственно. После вычисления следующего набора векторов из матриц \mathbf{X}, \mathbf{Y} вычитаются очередные одноранговые аппроксимации. При этом предполагается, что исходные матрицы \mathbf{X} и \mathbf{Y} нормированы (имеют нулевое среднее и единичное среднее отклонение).

Вектора $\boldsymbol{\tau}_k$ и $\boldsymbol{\nu}_k$ из внутреннего цикла алгоритма 1 содержат информацию о матрице исходных объектов \mathbf{X} и матрице целевых объектов \mathbf{Y} соответственно. Блоки из шагов (6)–(7) и шагов (8)–(9) — аналоги метода PCA для матриц \mathbf{X} и \mathbf{Y} . Последовательное выполнение блоков позволяет учесть взаимную связь между матрицами \mathbf{X} и \mathbf{Y} .

Утверждение 1. Максимизации ковариации между векторами $\boldsymbol{\tau}_k$ и $\boldsymbol{\nu}_k$ сохраняет дисперсию столбцов матриц \mathbf{X} и \mathbf{Y} и учитывает их линейную зависимость.

Algorithm 1 Алгоритм PLS

Вход: $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, l$;

Выход: $\mathbf{T}, \mathbf{P}, \mathbf{Q}$;

- 1: нормировать матрицы \mathbf{X} и \mathbf{Y} по столбцам
 - 2: инициализировать $\boldsymbol{\nu}_0$ (первый столбец матрицы \mathbf{Y})
 - 3: $\mathbf{X}_1 = \mathbf{X}; \mathbf{Y}_1 = \mathbf{Y}$
 - 4: для $k = 1, \dots, l$
 - 5: **повторять**
 - 6: $\mathbf{w}_k := \mathbf{X}_k^\top \boldsymbol{\nu}_{k-1} / (\boldsymbol{\nu}_{k-1}^\top \boldsymbol{\nu}_{k-1}); \quad \mathbf{w}_k := \frac{\mathbf{w}_k}{\|\mathbf{w}_k\|}$
 - 7: $\boldsymbol{\tau}_k := \mathbf{X}_k \mathbf{w}_k$
 - 8: $\mathbf{c}_k := \mathbf{Y}_k^\top \boldsymbol{\tau}_k / (\boldsymbol{\tau}_k^\top \boldsymbol{\tau}_k); \quad \mathbf{c}_k := \frac{\mathbf{c}_k}{\|\mathbf{c}_k\|}$
 - 9: $\boldsymbol{\nu}_k := \mathbf{Y}_k \mathbf{c}_k$
 - 10: **пока** $\boldsymbol{\tau}_k$ не стабилизируется
 - 11: $\mathbf{p}_k := \mathbf{X}_k^\top \boldsymbol{\tau}_k / (\boldsymbol{\tau}_k^\top \boldsymbol{\tau}_k), \mathbf{q}_k := \mathbf{Y}_k^\top \boldsymbol{\tau}_k / (\boldsymbol{\tau}_k^\top \boldsymbol{\tau}_k)$
 - 12: $\mathbf{X}_{k+1} := \mathbf{X}_k - \boldsymbol{\tau}_k \mathbf{p}_k^\top$
 - 13: $\mathbf{Y}_{k+1} := \mathbf{Y}_k - \boldsymbol{\tau}_k \mathbf{q}_k^\top$
-

Во внутреннем цикле алгоритма 1 вычисляются нормированные вектора весов \mathbf{w}_k и \mathbf{c}_k . Из данных векторов строятся матрицы весов \mathbf{W} и \mathbf{C} соответственно.

Утверждение 2. В результате выполнения внутреннего цикла вектора \mathbf{w}_k и \mathbf{c}_k будут собственными векторами матриц $\mathbf{X}_k^\top \mathbf{Y}_k \mathbf{Y}_k^\top \mathbf{X}_k$ и $\mathbf{Y}_k^\top \mathbf{X}_k \mathbf{X}_k^\top \mathbf{Y}_k$, соответствующими максимальным собственным значениям.

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_k &\propto \mathbf{X}_k^\top \boldsymbol{\nu}_{k-1} \propto \mathbf{X}_k^\top \mathbf{Y}_k \mathbf{c}_{k-1} \propto \mathbf{X}_k^\top \mathbf{Y}_k \mathbf{Y}_k^\top \boldsymbol{\tau}_{k-1} \propto \mathbf{X}_k^\top \mathbf{Y}_k \mathbf{Y}_k^\top \mathbf{X}_k \mathbf{w}_{k-1}, \\ \mathbf{c}_k &\propto \mathbf{Y}_k^\top \boldsymbol{\tau}_k \propto \mathbf{Y}_k^\top \mathbf{X}_k \mathbf{w}_k \propto \mathbf{Y}_k^\top \mathbf{X}_k \mathbf{X}_k^\top \boldsymbol{\nu}_{k-1} \propto \mathbf{Y}_k^\top \mathbf{X}_k \mathbf{X}_k^\top \mathbf{Y}_k \mathbf{c}_{k-1}, \end{aligned}$$

где символ \propto означает равенство с точностью до мультипликативной константы.

Утверждение 3. Обновление векторов по шагам (6)–(9) алгоритма 1 соответствует максимизации ковариации между векторами $\boldsymbol{\tau}_k$ и $\boldsymbol{\nu}_k$.

После завершения внутреннего цикла на шаге (11) вычисляются вектора $\mathbf{p}_k, \mathbf{q}_k$ проецированием столбцов матриц \mathbf{X}_k и \mathbf{Y}_k на вектор $\boldsymbol{\tau}_k$. Для перехода на следующий шаг необходимо вычесть из матриц \mathbf{X}_k и \mathbf{Y}_k одноранговые аппроксимации $\boldsymbol{\tau}_k \mathbf{p}_k^\top$ и $\boldsymbol{\tau}_k \mathbf{q}_k^\top$

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{k+1} &= \mathbf{X}_k - \boldsymbol{\tau}_k \mathbf{p}_k^\top = \mathbf{X} - \sum_k \boldsymbol{\tau}_k \mathbf{p}_k^\top, \\ \mathbf{Y}_{k+1} &= \mathbf{Y}_k - \boldsymbol{\tau}_k \mathbf{q}_k^\top = \mathbf{Y} - \sum_k \boldsymbol{\tau}_k \mathbf{q}_k^\top. \end{aligned}$$

При этом каждый следующий вектор $\boldsymbol{\tau}_k$ оказывается ортогонален всем векторам $\boldsymbol{\tau}_j$, $j = 1, \dots, k$.

Для получения прогнозов модели и нахождения параметров модели домножим справа формулу (8) на матрицу \mathbf{W} . Строки матрицы невязок \mathbf{E} ортогональны столбцам матрицы \mathbf{W} , поэтому

$$\mathbf{XW} = \mathbf{TP}^T \mathbf{W}.$$

Линейное преобразование между объектами в исходном и латентном пространстве имеет вид

$$\mathbf{T} = \mathbf{XW}^*, \quad (16)$$

где $\mathbf{W}^* = \mathbf{W}(\mathbf{P}^T \mathbf{W})^{-1}$.

Матрица параметров модели 4 находится из уравнений (9), (16)

$$\mathbf{Y} = \mathbf{TQ}^T + \mathbf{E} = \mathbf{XW}^* \mathbf{Q}^T + \mathbf{E} = \mathbf{X}\boldsymbol{\Theta} + \mathbf{E}. \quad (17)$$

Таким образом, параметры модели (4) равны

$$\boldsymbol{\Theta} = \mathbf{W}(\mathbf{P}^T \mathbf{W})^{-1} \mathbf{Q}^T.$$

Финальная модель (17) является линейной, низкоразмерной в скрытом пространстве. Это снижает избыточность данных и повышает стабильность модели.

Пусть $\mathbf{f}_1(\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\Theta}_1)$, $\mathbf{f}_2(\mathbf{x}_2, \boldsymbol{\Theta}_2)$ — линейные модели декодирования сигналов. Рассмотрим аддитивную суперпозицию моделей декодирования, то есть модель (2) вида

$$\mathbf{y} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\Theta}) + \boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\Theta}_1 \mathbf{x}_1 + \boldsymbol{\Theta}_2 \mathbf{x}_2 + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (18)$$

где объект $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2] \in \mathbb{R}^n$ состоит из двух подвекторов $\mathbf{x}_1 \in \mathbb{R}^k$, $\mathbf{x}_2 \in \mathbb{R}^{n-k}$. Тем самым матрица параметров $\boldsymbol{\Theta} \in \mathbb{R}^{n \times r}$ состоит из двух подматриц $\boldsymbol{\Theta}_1 \in \mathbb{R}^{k \times r}$, $\boldsymbol{\Theta}_2 \in \mathbb{R}^{n-k \times r}$.

Утверждение 4. Матрица параметров $\boldsymbol{\Theta}$ для модели (18), доставляющая минимум функции ошибки (5), имеет вид:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Theta}_1 &= (\mathbf{X}_1^T \mathbf{M}_{\mathbf{X}_2} \mathbf{X}_1)^{-1} \mathbf{X}_1^T \mathbf{M}_{\mathbf{X}_2} \mathbf{Y}, \\ \boldsymbol{\Theta}_2 &= (\mathbf{X}_2^T \mathbf{M}_{\mathbf{X}_1} \mathbf{X}_2)^{-1} \mathbf{X}_2^T \mathbf{M}_{\mathbf{X}_1} \mathbf{Y}, \end{aligned}$$

где $\mathbf{M}_{\mathbf{X}_1} = (\mathbf{I} - \mathbf{P}_{\mathbf{X}_1})$, $\mathbf{M}_{\mathbf{X}_2} = (\mathbf{I} - \mathbf{P}_{\mathbf{X}_2})$, $\mathbf{P}_{\mathbf{X}_1} = \mathbf{X}_1(\mathbf{X}_1^T \mathbf{X}_1)^{-1} \mathbf{X}_1^T$, $\mathbf{P}_{\mathbf{X}_2} = \mathbf{X}_2(\mathbf{X}_2^T \mathbf{X}_2)^{-1} \mathbf{X}_2^T$.

Утверждение 5. Оптимальная подматрица $\boldsymbol{\Theta}_2$ в модели (18) является решением задачи регрессии

$$\|\mathbf{Y}_1 - \mathbf{X}_{21} \boldsymbol{\Theta}_2\| \rightarrow \min_{\boldsymbol{\Theta}_2}, \quad (19)$$

где $\mathbf{Y}_1 = \mathbf{M}_{\mathbf{X}_1} \mathbf{Y}$, $\mathbf{X}_{21} = \mathbf{M}_{\mathbf{X}_1} \mathbf{X}_2$.

Утверждение 6. Если в задаче (18) $\text{span}(\mathbf{X}_1) \cap \text{span}(\mathbf{X}_2) = \emptyset$, то есть столбцы матрицы \mathbf{X}_1 ортогональны столбцам матрицы \mathbf{X}_2 , то Θ_2 является решением задачи регрессии

$$\|\mathbf{Y} - \mathbf{X}_2 \Theta_2\| \rightarrow \min_{\Theta_2}.$$

Теорема 1. Если в задаче (18) $\text{span}(\mathbf{X}_1) \neq \text{span}(\mathbf{X}_2)$, то ошибка аддитивной суперпозиции моделей не превышает ошибки каждой из отдельных моделей

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\Theta^*, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) &\leq \mathcal{L}(\Theta_1, \mathbf{X}_1, \mathbf{Y}), \\ \mathcal{L}(\Theta^*, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) &\leq \mathcal{L}(\Theta_2, \mathbf{X}_2, \mathbf{Y}). \end{aligned}$$

Рассмотрим случай линейной авторегрессионной модели \mathbf{f}_y^{AR} из определения 4 и линейной регрессионной модели $\mathbf{f}_{\mathbf{xy}}^{\text{R}}$ из определения 5. Пусть модель декодирования $\mathbf{f}_{\mathbf{xy}} : \mathbb{R}^{h_x \times m} \times \mathbb{R}^{h_y \times r} \rightarrow \mathbb{R}^{p \times r}$ из определения 6 является аддитивной суперпозицией авторегрессионной и регрессионной моделей. Тогда при условии не совпадений подпространств, образованных линейными оболочками входами моделей, ошибка суперпозиции не будет превышать ошибок авторегрессионной и регрессионной моделей. Данное утверждение позволяет осуществлять выбор моделей в суперпозиции, основанный на анализе проекций подпространств, построенных на линейных оболочках исходных признаков описаний.

Анализ линейных методов проекции в скрытое пространство.

В главе приводится вычислительный эксперимент на реальных данных потребления электроэнергии и сигналах электрокортикограммы. Показано, что линейные методы проекции в скрытое пространство находят скрытое пространство размерности существенно меньшей размерности исходного описания данных. Ошибка модели, использующей скрытое пространство ниже базовой модели.

Также приводится вычислительный эксперимент для нелинейных методов на задаче восстановления изображений. В данном случае сложность линейных моделей оказывается недостаточной. Построение согласованной модели в пространстве изображений позволяет получить значительный прирост в качестве восстановленных изображений.

Глава 3 посвящена задаче выбора признаков для задачи декодирования сигналов.

Задача выбора признаков заключается в поиске оптимального подмножества $\mathcal{A} \subset \{1, \dots, n\}$ индексов признаков среди всех возможных $2^n - 1$ вариантов. Существует взаимнооднозначное отображение между подмножеством \mathcal{A} и булевым вектором $\mathbf{a} \in \{0, 1\}^n$, компоненты которого указывают, выбран ли признак. Для нахождения оптимального вектора \mathbf{a} введем функцию ошибки выбора признаков $S(\mathbf{a}, \mathbf{X}, \mathbf{Y})$. Проблема выбора признаков принимает вид:

$$\mathbf{a} = \arg \min_{\mathbf{a}' \in \{0,1\}^n} S(\mathbf{a}', \mathbf{X}, \mathbf{Y}). \quad (20)$$

Целью выбора признаков является построение функции $S(\mathbf{a}, \mathbf{X}, \mathbf{Y})$.

Для решения задачи (20) применяется релаксация задачи (20) к непрерывной области определения $[0, 1]^n$:

$$\mathbf{z} = \arg \min_{\mathbf{z}' \in [0, 1]^n} S(\mathbf{z}', \mathbf{X}, \mathbf{Y}). \quad (21)$$

Здесь компоненты вектора \mathbf{z} — значения нормированных коэффициентов значимости признаков. Решение (20) восстанавливается с помощью отсечения по порогу:

$$\mathbf{a} = [a_j]_{j=1}^n, \quad a_j = \begin{cases} 1, & z_j > \tau; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (22)$$

τ — гиперпараметр, который может быть подобран вручную или выбран с помощью кросс-валидации.

Как только решение \mathbf{a} задачи (20) получено, задача (5) принимает вид:

$$\mathcal{L}(\Theta_{\mathcal{A}}, \mathbf{X}_{\mathcal{A}}, \mathbf{Y}) = \|\mathbf{Y} - \mathbf{X}_{\mathcal{A}}\Theta_{\mathcal{A}}\|_2^2 \rightarrow \min_{\Theta_{\mathcal{A}}},$$

где индекс \mathcal{A} обозначает подматрицу со столбцами, индексы которых содержатся в \mathcal{A} .

Если между столбцами матрицы исходных объектов \mathbf{X} существует линейная зависимость, то решение задачи линейной регрессии

$$\|\mathbf{v} - \mathbf{X}\boldsymbol{\theta}\|_2^2 \rightarrow \min_{\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^n}. \quad (23)$$

оказывается неустойчивым. Методы выбора признаков находят подмножество $\mathcal{A} \in \{1, \dots, n\}$ оптимальных столбцов матрицы \mathbf{X} .

Метод QPFS (Rodriguez-Lujan: 2010) выбирает некоррелированные признаки, релевантные целевому вектору \mathbf{v} . Чтобы формализовать этот подход, введем две функции: $\text{Sim}(\mathbf{X})$ и $\text{Rel}(\mathbf{X}, \mathbf{v})$. $\text{Sim}(\mathbf{X})$ контролирует избыточность между признаками, $\text{Rel}(\mathbf{X}, \mathbf{v})$ содержит релевантности между каждым признаком и целевым вектором. Мы хотим минимизировать функцию Sim и максимизировать Rel одновременно.

QPFS предлагает явный способ построения функций Sim и Rel . Метод минимизирует следующую функцию ошибки

$$\underbrace{\mathbf{z}^T \mathbf{Q} \mathbf{z}}_{\text{Sim}} - \alpha \cdot \underbrace{\mathbf{b}^T \mathbf{z}}_{\text{Rel}} \rightarrow \min_{\substack{\mathbf{z} \in \mathbb{R}_+^n \\ \|\mathbf{z}\|_1 = 1}}. \quad (24)$$

Элементы матрицы парных взаимодействий $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ содержат коэффициенты попарного сходства между признаками. Вектор релевантностей признаков $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$ выражает сходство между каждым признаком и целевым вектором \mathbf{v} . Нормированный вектор \mathbf{z} отражает значимость каждого признака. Функция ошибки (24) штрафует зависимые признаки функцией Sim и штрафует признаки,

не релевантные к целевой переменной функцией Rel. Параметр α позволяет контролировать компромисс между Sim и Rel. Авторы оригинальной статьи QPFS (Rodriguez-Lujan: 2010) предложили способ выбора α , чтобы уравновесить вклад членов $\text{Sim}(\mathbf{X})$ и $\text{Rel}(\mathbf{X}, \mathbf{v})$

$$\alpha = \frac{\overline{\mathbf{Q}}}{\overline{\mathbf{Q}} + \overline{\mathbf{b}}}, \quad \text{где } \overline{\mathbf{Q}} = \text{mean}(\mathbf{Q}), \quad \overline{\mathbf{b}} = \text{mean}(\mathbf{b}).$$

Чтобы выделить оптимальное подмножество признаков, применяется отсечение по порогу (22).

Для измерения сходства используется выборочный коэффициент корреляции Пирсона между парами признаков для функции Sim, и между признаками и целевым вектором для функции Rel:

$$\mathbf{Q} = [|\text{corr}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)|]_{i,j=1}^n, \quad \mathbf{b} = [|\text{corr}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v})|]_{i=1}^n. \quad (25)$$

Здесь

$$\text{corr}(\mathbf{x}, \mathbf{v}) = \frac{\sum_{i=1}^m (\mathbf{x}_i - \overline{\mathbf{x}})(\mathbf{v}_i - \overline{\mathbf{v}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (\mathbf{x}_i - \overline{\mathbf{x}})^2 \sum_{i=1}^m (\mathbf{v}_i - \overline{\mathbf{v}})^2}}.$$

Задача (24) является выпуклой, если матрица \mathbf{Q} является неотрицательно определенной. Чтобы удовлетворить этому условию спектр матрицы \mathbf{Q} смещается, и матрица \mathbf{Q} заменяется на $\mathbf{Q} - \lambda_{\min} \mathbf{I}$, где λ_{\min} является минимальным собственным значением \mathbf{Q} .

В случае векторной целевой переменной компоненты целевой переменной могут коррелировать между собой. Предлагаются методы, учитывающие зависимости как в исходном, так и в целевом пространствах.

Агрегация релевантностей целевых векторов. В работе (Motrenko: 2018), чтобы применить метод QPFS к векторному случаю ($r > 1$), релевантности признаков агрегируются по всем r компонентам целевой переменной. Член $\text{Sim}(\mathbf{X})$ остаётся без изменений, матрица парных взаимодействий \mathbf{Q} определяется как (25). Вектор релевантностей \mathbf{b} агрегируется по всем компонентам целевой переменной и определяется как

$$\mathbf{b} = \left[\sum_{k=1}^r |\text{corr}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_k)| \right]_{i=1}^n.$$

Недостатком такого подхода является отсутствие учёта зависимостей в столбцах матрицы \mathbf{Y} .

Симметричный учёт значимости признаков и целевых переменных. Добавим член $\text{Sim}(\mathbf{Y})$ и изменим член $\text{Rel}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ следующим образом:

$$\alpha_1 \cdot \underbrace{\mathbf{z}_x^\top \mathbf{Q}_x \mathbf{z}_x}_{\text{Sim}(\mathbf{X})} - \alpha_2 \cdot \underbrace{\mathbf{z}_x^\top \mathbf{B} \mathbf{z}_y}_{\text{Rel}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})} + \alpha_3 \cdot \underbrace{\mathbf{z}_y^\top \mathbf{Q}_y \mathbf{z}_y}_{\text{Sim}(\mathbf{Y})} \rightarrow \min_{\substack{\mathbf{z}_x \geq \mathbf{0}_n, \mathbf{1}_n^\top \mathbf{z}_x = 1 \\ \mathbf{z}_y \geq \mathbf{0}_r, \mathbf{1}_r^\top \mathbf{z}_y = 1}}. \quad (26)$$

Определим элементы матриц $\mathbf{Q}_x \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{Q}_y \in \mathbb{R}^{r \times r}$ и $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times r}$ следующим образом:

$$\mathbf{Q}_x = [|\text{corr}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)|]_{i,j=1}^n, \quad \mathbf{Q}_y = [|\text{corr}(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j)|]_{i,j=1}^r, \quad \mathbf{B} = [|\text{corr}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_j)|]_{i=1, \dots, n, j=1, \dots, r}.$$

Вектор \mathbf{z}_x содержит коэффициенты значимости признаков, \mathbf{z}_y — коэффициенты значимости целевых векторов. Коррелированные целевые столбцы штрафуются членом $\text{Sim}(\mathbf{Y})$ и получают более низкие значения значимости.

Коэффициенты α_1 , α_2 , и α_3 контролируют влияние каждого члена на функцию (26) и удовлетворяют следующим условиям:

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1, \quad \alpha_i \geq 0, \quad i = 1, 2, 3.$$

Утверждение 7. Баланс между $\text{Sim}(\mathbf{X})$, $\text{Rel}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ и $\text{Sim}(\mathbf{Y})$ в задаче (26) достигается при:

$$\alpha_1 \propto \overline{\mathbf{Q}_y} \overline{\mathbf{B}}, \quad \alpha_2 \propto \overline{\mathbf{Q}_x} \overline{\mathbf{Q}_y}, \quad \alpha_3 \propto \overline{\mathbf{Q}_x} \overline{\mathbf{B}}. \quad (27)$$

Здесь $\overline{\mathbf{Q}_x}$, $\overline{\mathbf{B}}$ и $\overline{\mathbf{Q}_y}$ — средние значения соответствующих матриц \mathbf{Q}_x , \mathbf{B} и \mathbf{Q}_y членов $\text{Sim}(\mathbf{X})$, $\text{Rel}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ и $\text{Sim}(\mathbf{Y})$.

Минимаксная постановка задачи выбора признаков. Функция (26) является симметричной по отношению к \mathbf{z}_x и \mathbf{z}_y . Она штрафует признаки, которые коррелированы и не имеют отношения к целевым векторам. Кроме того, она штрафует целевые вектора, которые коррелированы между собой и недостаточно коррелируют с признаками. Это приводит к малым значениям значимостей для целевых векторов, которые слабо коррелируют с признаками, и большим значениям для целевых векторов, которые сильно коррелируют с признаками. Сформулируем две взаимосвязанные задачи:

$$\alpha_1 \cdot \underbrace{\mathbf{z}_x^\top \mathbf{Q}_x \mathbf{z}_x}_{\text{Sim}(\mathbf{X})} - \alpha_2 \cdot \underbrace{\mathbf{z}_x^\top \mathbf{B} \mathbf{z}_y}_{\text{Rel}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})} \rightarrow \min_{\substack{\mathbf{z}_x \geq \mathbf{0}_n, \\ \mathbf{1}_n^\top \mathbf{z}_x = 1}}, \quad (28)$$

$$\alpha_3 \cdot \underbrace{\mathbf{z}_y^\top \mathbf{Q}_y \mathbf{z}_y}_{\text{Sim}(\mathbf{Y})} + \alpha_2 \cdot \underbrace{\mathbf{z}_x^\top \mathbf{B} \mathbf{z}_y}_{\text{Rel}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})} \rightarrow \min_{\substack{\mathbf{z}_y \geq \mathbf{0}_r, \\ \mathbf{1}_r^\top \mathbf{z}_y = 1}}. \quad (29)$$

Задачи (28) и (29) объединяются в совместную минимакс или максмин постановку

$$\min_{\substack{\mathbf{z}_x \geq \mathbf{0}_n, \\ \mathbf{1}_n^\top \mathbf{z}_x = 1}} \max_{\substack{\mathbf{z}_y \geq \mathbf{0}_r, \\ \mathbf{1}_r^\top \mathbf{z}_y = 1}} f(\mathbf{z}_x, \mathbf{z}_y), \quad \left(\text{или} \max_{\substack{\mathbf{z}_y \geq \mathbf{0}_r, \\ \mathbf{1}_r^\top \mathbf{z}_y = 1}} \min_{\substack{\mathbf{z}_x \geq \mathbf{0}_n, \\ \mathbf{1}_n^\top \mathbf{z}_x = 1}} f(\mathbf{z}_x, \mathbf{z}_y) \right), \quad (30)$$

где

$$f(\mathbf{z}_x, \mathbf{z}_y) = \alpha_1 \cdot \underbrace{\mathbf{z}_x^\top \mathbf{Q}_x \mathbf{z}_x}_{\text{Sim}(\mathbf{X})} - \alpha_2 \cdot \underbrace{\mathbf{z}_x^\top \mathbf{B} \mathbf{z}_y}_{\text{Rel}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})} - \alpha_3 \cdot \underbrace{\mathbf{z}_y^\top \mathbf{Q}_y \mathbf{z}_y}_{\text{Sim}(\mathbf{Y})}.$$

Теорема 2. Для положительно определенной матрицы \mathbf{Q}_x и \mathbf{Q}_y , максмин и минимакс задачи (30) имеют одинаковое оптимальное значение.

Для решения минимакс задачи (30), зафиксируем некоторый $\mathbf{z}_x \in \mathbb{C}^n$. Для фиксированного вектора \mathbf{z}_x решаем задачу

$$\max_{\mathbf{z}_y \in \mathbb{C}^r} f(\mathbf{z}_x, \mathbf{z}_y) = \max_{\substack{\mathbf{z}_y \geq \mathbf{0}_r \\ \mathbf{1}_r^\top \mathbf{z}_y = 1}} [\alpha_1 \cdot \mathbf{z}_x^\top \mathbf{Q}_x \mathbf{z}_x - \alpha_2 \cdot \mathbf{z}_x^\top \mathbf{B} \mathbf{z}_y - \alpha_3 \cdot \mathbf{z}_y^\top \mathbf{Q}_y \mathbf{z}_y]. \quad (31)$$

Лагранжиан для данной задачи:

$$L(\mathbf{z}_x, \mathbf{z}_y, \lambda, \boldsymbol{\mu}) = \alpha_1 \cdot \mathbf{z}_x^\top \mathbf{Q}_x \mathbf{z}_x - \alpha_2 \cdot \mathbf{z}_x^\top \mathbf{B} \mathbf{z}_y - \alpha_3 \cdot \mathbf{z}_y^\top \mathbf{Q}_y \mathbf{z}_y + \lambda \cdot (\mathbf{1}_r^\top \mathbf{z}_y - 1) + \boldsymbol{\mu}^\top \mathbf{z}_y.$$

Здесь вектор множителей Лагранжа $\boldsymbol{\mu}$, который соответствует ограничениям на неравенства $\mathbf{z}_y \geq \mathbf{0}_r$, является неотрицательным. Двойственной задачей является

$$\min_{\lambda, \boldsymbol{\mu} \geq \mathbf{0}_r} g(\mathbf{z}_x, \lambda, \boldsymbol{\mu}) = \min_{\lambda, \boldsymbol{\mu} \geq \mathbf{0}_r} \left[\max_{\mathbf{z}_y \in \mathbb{R}^r} L(\mathbf{z}_x, \mathbf{z}_y, \lambda, \boldsymbol{\mu}) \right]. \quad (32)$$

Для задачи квадратичного программирования (31) с положительно определенными матрицами \mathbf{Q}_x и \mathbf{Q}_y выполняются условия сильной двойственности. Таким образом, оптимальное значение (31) равно оптимальному значению (32). Это позволяет перейти от решения задачи (30) к решению задачи

$$\min_{\mathbf{z}_x \in \mathbb{C}^n, \lambda, \boldsymbol{\mu} \geq \mathbf{0}_r} g(\mathbf{z}_x, \lambda, \boldsymbol{\mu}). \quad (33)$$

Полагая градиент $\nabla_{\mathbf{z}_y} L(\mathbf{z}_x, \mathbf{z}_y, \lambda, \boldsymbol{\mu})$ равным нулю, получим оптимальное значение \mathbf{z}_y :

$$\mathbf{z}_y = \frac{1}{2\alpha_3} \mathbf{Q}_y^{-1} \left(-\alpha_2 \cdot \mathbf{B}^\top \mathbf{z}_x + \lambda \cdot \mathbf{1}_r + \boldsymbol{\mu} \right).$$

Двойственная функция принимает вид

$$\begin{aligned} g(\mathbf{z}_x, \lambda, \boldsymbol{\mu}) &= \max_{\mathbf{z}_y \in \mathbb{R}^r} L(\mathbf{z}_x, \mathbf{z}_y, \lambda, \boldsymbol{\mu}) = \mathbf{z}_x^\top \left(-\frac{\alpha_2^2}{4\alpha_3} \cdot \mathbf{B} \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{B}^\top - \alpha_1 \cdot \mathbf{Q}_x \right) \mathbf{z}_x \\ &\quad - \frac{1}{4\alpha_3} \lambda^2 \cdot \mathbf{1}_r^\top \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{1}_r - \frac{1}{4\alpha_3} \cdot \boldsymbol{\mu}^\top \mathbf{Q}_y^{-1} \boldsymbol{\mu} + \frac{\alpha_2}{2\alpha_3} \lambda \cdot \mathbf{1}_r^\top \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{B}^\top \mathbf{z}_x \\ &\quad - \frac{1}{2\alpha_3} \lambda \cdot \mathbf{1}_r^\top \mathbf{Q}_y^{-1} \boldsymbol{\mu} + \frac{\alpha_2}{2\alpha_3} \cdot \boldsymbol{\mu}^\top \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{B}^\top \mathbf{z}_x + \lambda. \end{aligned} \quad (34)$$

Тем самым задача (33) является квадратичной задачей с $n + r + 1$ переменными.

Несимметричный учёт значимостей признаков и целевых переменных. Добавим линейный член $\mathbf{b}^\top \mathbf{z}_y$ в член $\text{Rel}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ следующим образом:

$$\underbrace{\alpha_1 \cdot \mathbf{z}_x^\top \mathbf{Q}_x \mathbf{z}_x}_{\text{Sim}(\mathbf{X})} - \alpha_2 \cdot \underbrace{\left(\mathbf{z}_x^\top \mathbf{B} \mathbf{z}_y - \mathbf{b}^\top \mathbf{z}_y \right)}_{\text{Rel}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})} + \alpha_3 \cdot \underbrace{\mathbf{z}_y^\top \mathbf{Q}_y \mathbf{z}_y}_{\text{Sim}(\mathbf{Y})} \rightarrow \min_{\substack{\mathbf{z}_x \geq \mathbf{0}_n, \mathbf{1}_n^\top \mathbf{z}_x = 1 \\ \mathbf{z}_y \geq \mathbf{0}_r, \mathbf{1}_r^\top \mathbf{z}_y = 1}}. \quad (35)$$

Утверждение 8. Пусть вектор \mathbf{b} равен

$$b_j = \max_{i=1, \dots, n} [\mathbf{B}]_{i,j}.$$

Тогда значение коэффициентов значимостей вектора \mathbf{z}_y будут неотрицательными в $\text{Rel}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ для задачи (35).

Утверждение 9. Баланс между членами $\text{Sim}(\mathbf{X})$, $\text{Rel}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ и $\text{Rel}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ для задачи (35) достигается при следующих коэффициентах:

$$\alpha_1 \propto \overline{\mathbf{Q}}_y (\overline{\mathbf{b}} - \overline{\mathbf{B}}), \quad \alpha_2 \propto \overline{\mathbf{Q}}_x \overline{\mathbf{Q}}_y, \quad \alpha_3 \propto \overline{\mathbf{Q}}_x \overline{\mathbf{B}}.$$

Утверждение 10. Для случая $r = 1$, предложенные функции (26), (30) и (35) совпадают с оригинальным методом QPFS (24).

Таблица 1 демонстрирует основные идеи и функции ошибок для каждого метода. RelAgg является базовой стратегией и не учитывает корреляции в целевом пространстве. SymImp штрафует попарные корреляции между целевыми векторами. MinMax более чувствителен к целевым векторам, которые трудно предсказать. Стратегия AsymImp добавляет линейный член к функции SymImp, чтобы сделать вклад признаков и целевых векторов асимметричным.

Таблица 1: Обзор предлагаемых обобщений метода QPFS для векторной целевой переменной

Метод	Идея	Функция ошибки $S(\mathbf{z} \mathbf{X}, \mathbf{Y})$
RelAgg	$\min [\text{Sim}(\mathbf{X}) - \text{Rel}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})]$	$\min_{\mathbf{z}_x} [(1 - \alpha) \cdot \mathbf{z}_x^\top \mathbf{Q}_x \mathbf{z}_x - \alpha \cdot \mathbf{z}_x^\top \mathbf{B} \mathbf{1}_r]$
SymImp	$\min [\text{Sim}(\mathbf{X}) - \text{Rel}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) + \text{Sim}(\mathbf{Y})]$	$\min_{\mathbf{z}_x, \mathbf{z}_y} [\alpha_1 \cdot \mathbf{z}_x^\top \mathbf{Q}_x \mathbf{z}_x - \alpha_2 \cdot \mathbf{z}_x^\top \mathbf{B} \mathbf{z}_y + \alpha_3 \cdot \mathbf{z}_y^\top \mathbf{Q}_y \mathbf{z}_y]$
MinMax	$\min [\text{Sim}(\mathbf{X}) - \text{Rel}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})]$ $\max [\text{Rel}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) + \text{Sim}(\mathbf{Y})]$	$\min_{\mathbf{z}_x} \max_{\mathbf{z}_y} [\alpha_1 \cdot \mathbf{z}_x^\top \mathbf{Q}_x \mathbf{z}_x - \alpha_2 \cdot \mathbf{z}_x^\top \mathbf{B} \mathbf{z}_y - \alpha_3 \cdot \mathbf{z}_y^\top \mathbf{Q}_y \mathbf{z}_y]$
AsymImp	$\min [\text{Sim}(\mathbf{X}) - \text{Rel}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})]$ $\max [\text{Rel}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) + \text{Sim}(\mathbf{Y})]$	$\min_{\mathbf{z}_x, \mathbf{z}_y} [\alpha_1 \cdot \mathbf{z}_x^\top \mathbf{Q}_x \mathbf{z}_x - \alpha_2 \cdot (\mathbf{z}_x^\top \mathbf{B} \mathbf{z}_y - \mathbf{b}^\top \mathbf{z}_y) + \alpha_3 \cdot \mathbf{z}_y^\top \mathbf{Q}_y \mathbf{z}_y]$

В главе 4 предлагается метод выбора активных параметров модели с использованием метода выбора признаков с помощью квадратичного программирования. Приводится анализ параметров модели, которые не находятся в оптимуме. Рассматриваются задачи нелинейной регрессии с квадратичной функцией потерь, логистической регрессии с кросс-энтропийной функцией потерь.

Модель $f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})$ с параметрами $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^p$ предсказывает целевой объект $y \in \mathbb{Y}$ по исходному объекту $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$. Пространство \mathbb{Y} представляет собой бинарные метки классов $\{0, 1\}$ для задачи двухклассовой классификации и \mathbb{R} для задачи

регрессии. Даны матрица исходных объектов $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_m]^\top \in \mathbb{R}^{m \times n}$ и целевой вектор $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_m]^\top \in \mathbb{Y}^m$. Цель состоит в нахождении оптимальных параметров $\boldsymbol{\theta}^*$. Параметры $\boldsymbol{\theta}$ вычисляются минимизацией функции ошибки:

$$\boldsymbol{\theta}^* = \arg \min_{\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^p} \mathcal{L}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{X}, \mathbf{y}). \quad (36)$$

В качестве функции ошибки $\mathcal{L}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{X}, \mathbf{y})$ рассматриваются квадратичная ошибка для задачи регрессии:

$$\mathcal{L}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{X}, \mathbf{y}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{y} - \mathbf{f}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta})\|_2^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (y_i - f(\mathbf{x}_i, \boldsymbol{\theta}))^2, \quad (37)$$

и функция кросс-энтропии для задачи бинарной классификации:

$$\mathcal{L}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{X}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^m [y_i \log f(\mathbf{x}_i, \boldsymbol{\theta}) + (1 - y_i) \log(1 - f(\mathbf{x}_i, \boldsymbol{\theta}))]. \quad (38)$$

Задача (36) решается с помощью итеративной процедуры оптимизации. Для получения параметров на шаге k текущие параметры $\boldsymbol{\theta}^{k-1}$ обновляются по следующему правилу:

$$\boldsymbol{\theta}^k = \boldsymbol{\theta}^{k-1} + \Delta \boldsymbol{\theta}^{k-1}. \quad (39)$$

Для выбора вектора обновлений $\Delta \boldsymbol{\theta}$ используется метод оптимизации Ньютона.

Метод Ньютона нестабилен и вычислительно сложен. В работе предлагается стабильный метод Ньютона. Перед шагом градиента предлагается выбрать подмножество активных параметров модели, которые оказывают наибольшее влияние на функцию ошибки $\mathcal{L}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{X}, \mathbf{y})$.

Определение 10. Параметр θ_j для модели $f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})$ является *активным*, если $\mathbf{J}^\top(\mathbf{f}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) - \mathbf{y}) \neq 0$.

Обновление параметров производится только для отобранного множества индексов $\mathcal{A} = \{j : a_j = 1, \mathbf{a} \in \{0, 1\}^p\}$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\theta}_{\mathcal{A}}^k &= \boldsymbol{\theta}_{\mathcal{A}}^{k-1} + \Delta \boldsymbol{\theta}_{\mathcal{A}}^{k-1}, & \boldsymbol{\theta}_{\mathcal{A}} &= \{\theta_j : j \in \mathcal{A}\}, \\ \boldsymbol{\theta}_{\bar{\mathcal{A}}}^k &= \boldsymbol{\theta}_{\bar{\mathcal{A}}}^{k-1}, & \boldsymbol{\theta}_{\bar{\mathcal{A}}} &= \{\theta_j : j \notin \mathcal{A}\}. \end{aligned}$$

Чтобы выбрать оптимальное подмножество индексов \mathcal{A} , из всех возможных $2^p - 1$ подмножеств, вводится функция ошибки

$$\mathbf{a} = \arg \min_{\mathbf{a}' \in \{0, 1\}^p} S(\mathbf{a}', \mathbf{X}, \mathbf{y}, \boldsymbol{\theta}), \quad (40)$$

аналогичная функции ошибки (20) для задачи выбора признаков.

Метод QPFS используется для решения задачи (40). QPFS выбирает подмножество параметров \mathbf{a} для вектора обновлений $\Delta\boldsymbol{\theta}$, которые оказывают наибольшее влияние на вектор остатков и являются попарно независимыми. Функция ошибки (24) соответствует функции ошибки $S(\mathbf{a}, \mathbf{X}, \mathbf{y}, \boldsymbol{\theta})$

$$\mathbf{a} = \arg \max_{\mathbf{a}' \in \{1,0\}^p} S(\mathbf{a}', \mathbf{X}, \mathbf{y}, \boldsymbol{\theta}) \Leftrightarrow \arg \min_{\mathbf{a} \in \mathbb{R}_+^p, \|\mathbf{a}\|_1=1} [\mathbf{a}^\top \mathbf{Q} \mathbf{a} - \alpha \cdot \mathbf{b}^\top \mathbf{a}]. \quad (41)$$

Метод Ньютона использует условие оптимизации первого порядка для задачи (36) и линеаризует градиент $S(\boldsymbol{\theta})$

$$\nabla S(\boldsymbol{\theta} + \Delta\boldsymbol{\theta}) = \nabla S(\boldsymbol{\theta}) + \mathbf{H} \cdot \Delta\boldsymbol{\theta} = 0,$$

$$\Delta\boldsymbol{\theta} = -\mathbf{H}^{-1} \nabla S(\boldsymbol{\theta}).$$

где $\mathbf{H} = \nabla^2 S(\boldsymbol{\theta})$ является матрицей Гессiana функции ошибки $S(\boldsymbol{\theta})$.

Итерация (39) метода Ньютона имеет вид

$$\boldsymbol{\theta}^k = \boldsymbol{\theta}^{k-1} - \mathbf{H}^{-1} \nabla S(\boldsymbol{\theta}).$$

На каждой итерации требуется обращать матрицу Гессiana \mathbf{H} .

Размер шага метода Ньютона может быть чрезмерно большим. Для контроля размера шага обновлений добавим параметр η в правило обновления (39)

$$\boldsymbol{\theta}^k = \boldsymbol{\theta}^{k-1} + \eta \Delta\boldsymbol{\theta}^{k-1}, \quad \eta \in [0, 1].$$

Для выбора соответствующего размера шага η используется правило Армико (Armijo: 1966). Выбирается максимальное η так, чтобы выполнялось условие

$$S(\boldsymbol{\theta}^{k-1} + \eta \Delta\boldsymbol{\theta}^{k-1}) < S(\boldsymbol{\theta}^{k-1}) + \gamma \eta \nabla S^\top(\boldsymbol{\theta}^{k-1}) \boldsymbol{\theta}^{k-1}, \quad \gamma \in [0, 0.5].$$

Модель нелинейной регрессии. Предположим, что модель $f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})$ близка к линейной в окрестности точки $\boldsymbol{\theta} + \Delta\boldsymbol{\theta}$

$$\mathbf{f}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta} + \Delta\boldsymbol{\theta}) \approx \mathbf{f}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta}) + \mathbf{J} \cdot \Delta\boldsymbol{\theta},$$

где $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{m \times p}$ является матрицей Якоби

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial f(\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f(\mathbf{x}_m, \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial f(\mathbf{x}_m, \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_p} \end{pmatrix}.$$

В соответствии с этим предположением градиент $\nabla S(\boldsymbol{\theta})$ и Гессиан матрицы \mathbf{H} функции ошибки (37) равняются

$$\nabla S(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{J}^\top (\mathbf{y} - \mathbf{f}), \quad \mathbf{H} = \mathbf{J}^\top \mathbf{J}. \quad (42)$$

Данные предположения приводят к методу Гаусса-Ньютона и правилу обновления (39)

$$\boldsymbol{\theta}^k = \boldsymbol{\theta}^{k-1} + (\mathbf{J}^\top \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^\top (\mathbf{f} - \mathbf{y}).$$

Вектор обновления $\Delta \boldsymbol{\theta}$ является решением задачи линейной регрессии

$$\|\mathbf{e} - \mathbf{F} \Delta \boldsymbol{\theta}\|_2^2 \rightarrow \min_{\Delta \boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^p}, \quad (43)$$

где $\mathbf{e} = \mathbf{f} - \mathbf{y}$ и $\mathbf{F} = \mathbf{J}$.

В качестве нелинейной модели рассматривается модель двухслойной нейронной сети. В этом случае модель $f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})$ принимает вид:

$$f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) = \sigma(\mathbf{x}^\top \mathbf{W}_1) \mathbf{w}_2.$$

Здесь $\mathbf{W}_1 \in \mathbb{R}^{m \times h}$ — матрица параметров, которые соединяют исходные признаки с h скрытыми нейронами. Функция нелинейности $\sigma(\cdot)$ применяется поэлементно. Параметры $\mathbf{w}_2 \in \mathbb{R}^{h \times 1}$ соединяют скрытые нейроны с выходом. Вектор параметров модели $\boldsymbol{\theta}$ представляет собой объединение векторизованных матриц \mathbf{W}_1 , \mathbf{w}_2 .

Модель логистической регрессии. Для логистической регрессии модель имеет вид $f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) = \sigma(\mathbf{x}^\top \boldsymbol{\theta})$ с сигмоидной функцией активации $\sigma(\cdot)$. Градиент и Гессиан функции ошибки (38) равны

$$\nabla S(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{X}^\top (\mathbf{f} - \mathbf{y}), \quad \mathbf{H} = \mathbf{X}^\top \mathbf{R} \mathbf{X}, \quad (44)$$

где \mathbf{R} — это диагональная матрица с диагональными элементами $f(\mathbf{x}_i, \boldsymbol{\theta}) \cdot (1 - f(\mathbf{x}_i, \boldsymbol{\theta}))$.

Правило обновления (39) в этом случае принимает вид

$$\boldsymbol{\theta}^k = \boldsymbol{\theta}^{k-1} + (\mathbf{X}^\top \mathbf{R} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^\top (\mathbf{y} - \mathbf{f}).$$

Этот алгоритм известен как итеративный алгоритм взвешенных наименьших квадратов (IRLS) (Holland: 1977). Вектор обновлений $\Delta \boldsymbol{\theta}$ является решением задачи линейной регрессии

$$\|\mathbf{e} - \mathbf{F} \Delta \boldsymbol{\theta}\|_2^2 \rightarrow \min_{\Delta \boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^p}, \quad (45)$$

где $\mathbf{e} = \mathbf{R}^{-1/2}(\mathbf{y} - \mathbf{f})$ и $\mathbf{F} = \mathbf{R}^{1/2} \mathbf{X}$.

Предлагается адаптировать метод QPFS для решения задач (43) и (45). Матрица парных взаимодействий \mathbf{Q} и вектор релевантностей \mathbf{b} имеют вид

$$\mathbf{Q} = \text{Sim}(\mathbf{F}), \quad \mathbf{b} = \text{Rel}(\mathbf{F}, \mathbf{e}).$$

Выборочный коэффициент корреляции равен нулю для ортогональных векторов. Покажем, что в оптимальной точке $\boldsymbol{\theta}^*$ вектор \mathbf{e} ортогонален столбцам

матрицы \mathbf{F} . В этом случае вектор $\mathbf{b} = \text{Rel}(\mathbf{F}, \mathbf{e})$ равен нулю. Это означает, что член, учитывающий релевантность, в данном случае исключается. Условие оптимальности первого порядка гарантирует это свойство для модели нелинейной регрессии

$$\mathbf{F}^T \mathbf{e} = \mathbf{J}^T(\mathbf{f} - \mathbf{y}) = -\nabla S(\boldsymbol{\theta}^*) = \mathbf{0},$$

и для модели логистической регрессии

$$\mathbf{F}^T \mathbf{e} = \mathbf{X} \mathbf{R}^{-1/2} \mathbf{R}^{1/2}(\mathbf{y} - \mathbf{f}) = \mathbf{X}^T(\mathbf{y} - \mathbf{f}) = \nabla S(\boldsymbol{\theta}^*) = \mathbf{0}.$$

Псевдокод предлагаемого алгоритма приведён в алгоритме 2.

Algorithm 2 QPFS + Ньютон алгоритм

Вход: ε — допустимое отклонение;

τ — пороговое значение;

γ — параметр правила Армихо.

Выход: $\boldsymbol{\theta}^*$;

инициализировать $\boldsymbol{\theta}^0$;

$k := 1$;

повторять

вычислить \mathbf{e} и \mathbf{F} для (43) или (45) ;

$\mathbf{Q} := \text{Sim}(\mathbf{F})$, $\mathbf{b} := \text{Rel}(\mathbf{F}, \mathbf{e})$, $\alpha = \frac{\overline{\mathbf{Q}}}{\overline{\mathbf{Q}} + \mathbf{b}}$;

$\mathbf{a} := \arg \min_{\mathbf{a} \geq 0, \|\mathbf{a}\|_1 = 1} \mathbf{a}^T \mathbf{Q} \mathbf{a} - \alpha \cdot \mathbf{b}^T \mathbf{a}$;

$\mathcal{A} := \{j : a_j = 1\}$;

вычислить $\nabla S(\boldsymbol{\theta}^{k-1})$, \mathbf{H} для (42) или (44);

$\Delta \boldsymbol{\theta}^{k-1} = -\mathbf{H}^{-1} \nabla S(\boldsymbol{\theta}^{k-1})$;

$\eta := \text{ArmijoRule}(\boldsymbol{\theta}^{k-1}, \gamma)$;

$\boldsymbol{\theta}_{\mathcal{A}}^k = \boldsymbol{\theta}_{\mathcal{A}}^{k-1} + \eta \Delta \boldsymbol{\theta}_{\mathcal{A}}^{k-1}$;

$k := k + 1$;

пока $\frac{\|\boldsymbol{\theta}^k - \boldsymbol{\theta}^{k-1}\|}{\|\boldsymbol{\theta}^k\|} < \varepsilon$

В главе 5 ставится задача метрического обучения как поиск оптимальной метрики в целевом пространстве. При использовании в качестве функции ошибки модели квадратичной ошибки предполагается, что целевое пространство является евклидовым. Данное предположение не всегда является адекватным. Рассматриваются задачи кластеризации и классификации множества временных рядов.

Пусть $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_m]^T \in \mathbb{R}^{m \times n}$ — матрица исходных объектов. Исходный объект $\mathbf{x}_i = [x_i^1, \dots, x_i^n]^T$ задан в виде вектора в пространстве признаков. Требуется выявить кластерную структуру данных и разбить множество объектов \mathbf{X}

на множество непересекающихся кластеров $\mathbb{Y} = \{1, \dots, K\}$, т. е. построить отображение $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{Y}$. Обозначим $y_i = f(\mathbf{x}_i)$, $y_i \in \mathbb{Y}$ — метка кластера объекта \mathbf{x}_i . Необходимо выбрать метки кластеров $\{y_i\}_{i=1}^m$ таким образом, чтобы расстояния между кластерами были максимальными. Центроид $\boldsymbol{\mu}$ множества объектов \mathbf{X} и центроиды кластеров $\{\boldsymbol{\mu}_j\}_{j=1}^K$ вычисляются по формулам:

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mathbf{x}_i, \quad \boldsymbol{\mu}_j = \frac{\sum_{i=1}^m [y_i = y_j] \mathbf{x}_i}{\sum_{i=1}^m [y_i = y_j]}. \quad (46)$$

Введем на множестве объектов \mathbf{X} расстояние Махаланобиса

$$d_{\mathbf{A}}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \sqrt{(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)^\top \mathbf{A}^{-1} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)}, \quad (47)$$

где матрица трансформаций $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ является симметричной и неотрицательно определенной ($\mathbf{A}^\top = \mathbf{A}$, $\mathbf{A} \succeq 0$). Зададим в качестве матрицы трансформации матрицу выборочной ковариации

$$\mathbf{A} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu})(\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu})^\top. \quad (48)$$

Функцией ошибки кластеризации назовем межкластерное расстояние:

$$\mathcal{L}(\{\boldsymbol{\mu}_j\}_{j=1}^K, \mathbf{X}, \mathbf{y}) = - \sum_{j=1}^K N_j d_{\mathbf{A}}^2(\boldsymbol{\mu}_j, \boldsymbol{\mu}), \quad (49)$$

где $N_j = \sum_{i=1}^m [y_i = y_j]$ — число объектов в кластере j .

Поставим задачу кластеризации как задачу минимизации функции ошибки (49)

$$\mathcal{L}(\{\boldsymbol{\mu}_j\}_{j=1}^K, \mathbf{X}, \mathbf{y}) \rightarrow \min_{\boldsymbol{\mu}_j \in \mathbb{R}^n}. \quad (50)$$

Найдем такую матрицу \mathbf{A} , для которой функционал качества принимает максимальное значение:

$$\mathbf{A}^* = \arg \min_{\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}} S(\{\boldsymbol{\mu}_j^*\}_{j=1}^K, \mathbf{X}, \mathbf{y}), \quad (51)$$

где $\{\boldsymbol{\mu}_j^*\}_{j=1}^K$ — решение задачи кластеризации (50).

Для решения задач (50), (51) используется алгоритм адаптивного метрического обучения. Предлагается понизить размерность пространства объектов \mathbf{X} с помощью линейного ортогонального преобразования $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{l \times n}$, $\mathbf{P}^\top \mathbf{P} = \mathbf{I}$, где новая размерность $l < n$

$$\mathbf{t}_i = \mathbf{P} \mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^l, \quad i = 1, \dots, m.$$

Центроид $\hat{\boldsymbol{\mu}}$ множества объектов $\{\mathbf{t}_i\}_{i=1}^m$ вычисляется по формуле (46). Расстояния между объектами вычисляются по формуле (47), где в качестве матрицы $\hat{\mathbf{A}}$ используется матрица ковариаций (48) множества объектов $\{\hat{\mathbf{x}}_i\}_{i=1}^m$

$$\hat{\mathbf{A}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\mathbf{t}_i - \hat{\boldsymbol{\mu}})(\mathbf{t}_i - \hat{\boldsymbol{\mu}})^\top = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mathbf{P}(\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu})(\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu})^\top \mathbf{P}^\top = \mathbf{P} \mathbf{A} \mathbf{P}^\top.$$

Определение 11. Индикаторной матрицей назовем матрицу $\mathbf{Y} \in \mathbb{R}^{m \times K}$, где

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } f(\mathbf{x}_i) = y_j; \\ 0, & \text{если } f(\mathbf{x}_i) \neq y_j. \end{cases}$$

Определение 12. Взвешенной индикаторной матрицей назовем матрицу $\mathbf{L} = \mathbf{Y}(\mathbf{Y}^\top \mathbf{Y})^{-1/2} \in \mathbb{R}^{m \times K}$, элементы которой равны:

$$l_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N_j}}, & \text{если } f(\mathbf{x}_i) = y_j; \\ 0, & \text{если } f(\mathbf{x}_i) \neq y_j. \end{cases}$$

В работе (Ding: 2005) показано, что с использованием данных обозначений задача кластеризации (50) и задача метрического обучения (51) сводятся к общей задаче минимизации функции ошибки

$$\begin{aligned} \mathcal{L} &= -\frac{1}{m} \text{trace}(\mathbf{L}^\top \mathbf{X}^\top \mathbf{P}^\top \hat{\mathbf{A}}^{-1} \mathbf{P} \mathbf{X} \mathbf{L}) = \\ &= -\frac{1}{m} \text{trace}(\mathbf{L}^\top \mathbf{X}^\top \mathbf{P}^\top (\mathbf{P} \mathbf{A} \mathbf{P}^\top)^{-1} \mathbf{P} \mathbf{X} \mathbf{L}) \rightarrow \min_{\mathbf{P}, \mathbf{L}}. \end{aligned} \quad (52)$$

Для решения задачи (52) используется ЕМ алгоритм. На каждом шаге итеративно вычисляются текущие оптимальные значения матриц \mathbf{P} и \mathbf{L} . На E -шаге необходимо найти матрицу \mathbf{L} , которая является решением оптимизационной задачи (52) при фиксированной матрице \mathbf{P} . На M -шаге производится нахождение оптимального значения матрицы \mathbf{P} при фиксированной матрице \mathbf{L} .

Оптимизация матрицы \mathbf{P} с фиксированной матрицей \mathbf{L} . Для любых двух квадратных матриц \mathbf{A} и \mathbf{B} справедливо $\text{trace}(\mathbf{A}\mathbf{B}) = \text{trace}(\mathbf{B}\mathbf{A})$. Данное свойство позволяет переформулировать задачу (52) следующим образом:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{m} \text{trace}(\mathbf{L}^\top \mathbf{X}^\top \mathbf{P}^\top (\mathbf{P} \mathbf{A} \mathbf{P}^\top)^{-1} \mathbf{P} \mathbf{X} \mathbf{L}) = -\frac{1}{m} \text{trace}((\mathbf{P} \mathbf{A} \mathbf{P}^\top)^{-1} \mathbf{P} \mathbf{X} \mathbf{L} \mathbf{L}^\top \mathbf{X}^\top \mathbf{P}^\top).$$

Утверждение 11. Обозначим $\mathbf{B} = \mathbf{X} \mathbf{L} \mathbf{L}^\top \mathbf{X}^\top$. Обозначим через $\mathbf{P} = [\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_r]^\top$ матрицу, состоящую из r собственных векторов матрицы $\mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}$, отвечающих наибольшему собственным значениям. Тогда решением (52) является ортогональная матрица, полученная QR-разложением матрицы \mathbf{P}^\top .

Оптимизация матрицы \mathbf{L} с фиксированной матрицей \mathbf{P} . Обозначим $\hat{\mathbf{K}} = (1/N)\mathbf{X}^\top \mathbf{P}^\top \hat{\mathbf{A}}^{-1} \mathbf{P} \mathbf{X}$. В работе (Shawe-Taylor: 2004) показано, что тогда задача (52) эквивалентна задаче кластеризации k -средних с заданным ядром $\hat{\mathbf{K}}$.

При фиксированной матрице \mathbf{P} задача (52) принимает вид:

$$\text{trace}(\mathbf{L}^\top \hat{\mathbf{K}} \mathbf{L}) \rightarrow \max_{\mathbf{L} \in \mathbb{R}^{m \times r}}.$$

Матрица $\hat{\mathbf{K}}$ является симметричной и неотрицательно определенной, тем самым может быть выбрана в качестве ядра.

Для нахождения оптимального соответствия между временными рядами при решении задачи классификации предлагается процедура выравнивания временных рядов. Пусть объект $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^n$ — временной ряд, последовательность измерений некоторой исследуемой величины в различные моменты времени. Пусть задана выборка $\{(\mathbf{x}_i, y_i)\}_{i=1}^m$ — множество объектов с известными метками классов $y_i \in \mathbb{Y}$, где $\mathbb{Y} = \{1, \dots, K\}$ — множество меток классов.

Требуется построить точную, простую, устойчивую модель классификации $a: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{Y}$. Данную модель представим в виде суперпозиции

$$a(\mathbf{x}) = b \circ \mathbf{f} \circ G(\mathbf{x}, \{\mathbf{c}_e\}_{e=1}^K),$$

где G — процедура выравнивания временных рядов относительно центроидов классов $\{\mathbf{c}_e\}_{e=1}^K$, \mathbf{f} — алгоритм метрического обучения, b — алгоритм многоклассовой классификации.

Пусть \mathbf{X}_e — множество объектов обучающей выборки, принадлежащих одному классу $e \in \mathbb{Y}$. Центроидом множества объектов $\mathbf{X}_e = \{\mathbf{x}_i | y_i = e\}_{i=1}^m$ по расстоянию ρ назовем вектор $\mathbf{c}_e \in \mathbb{R}^n$ такой, что

$$\mathbf{c}_e = \underset{\mathbf{c} \in \mathbb{R}^n}{\text{argmin}} \sum_{\mathbf{x}_i \in \mathbf{X}_e} \rho(\mathbf{x}_i, \mathbf{c}). \quad (53)$$

Для нахождения центроида предлагается в качестве расстояния между временными рядами использовать путь наименьшей стоимости (Berndt: 1994, Müller: 2007), найденный методом динамической трансформации времени. Псевдокод решения оптимизационной задачи (53) приведен в алгоритме 3.

Метрическое обучение. Введем на множестве выравненных временных рядов расстояние Махаланобиса $d_{\mathbf{A}}$ 47. Представим матрицу трансформации \mathbf{A} в виде разложения $\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{L}^\top \mathbf{L}$. Матрица $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^{p \times n}$ — матрица линейного преобразования, где p задает размерность преобразованного пространства.

Расстояние $d_{\mathbf{A}}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ есть евклидово расстояние между $\mathbf{L}\mathbf{x}_i$ и $\mathbf{L}\mathbf{x}_j$:

$$\begin{aligned} d_{\mathbf{A}}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) &= \sqrt{(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)^\top \mathbf{L}^\top \mathbf{L} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)} = \\ &= \sqrt{(\mathbf{L}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j))^\top (\mathbf{L}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j))} = \|\mathbf{L}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)\|_2. \end{aligned}$$

Algorithm 3 Нахождение центроида DBA(\mathbf{X}_e, n_iter)

Вход: \mathbf{X}_e — множество временных рядов, принадлежащих одному и тому же классу, n_iter — количество итераций алгоритма.

Выход: \mathbf{c} — центроид множества \mathbf{X}_e .

- 1: задать начальное приближение приближение центроида \mathbf{c} ;
- 2: для $i = 1, \dots, n_iter$
- 3: для $\mathbf{x} \in \mathbf{X}_e$
- 4: вычислить выравнивающий путь между \mathbf{c} и \mathbf{x}
 $\text{alignment}(\mathbf{x}) := \text{DTWalignment}(\mathbf{c}, \mathbf{x})$;
- 5: объединить поэлементно множества индексов для каждого отсчета времени
 $\text{alignment} := \bigcup_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}_e} \text{alignment}(\mathbf{x})$;
- 6: $\mathbf{c} = \text{mean}(\text{alignment})$

DTWalignment(\mathbf{c}, \mathbf{x})

Вход: \mathbf{c}, \mathbf{x} — временные ряды.

Выход: alignment — выравнивающий путь. // каждый индекс временного ряда \mathbf{x} поставлен в однозначное соответствие индексу временного ряда \mathbf{c}

- 1: построить $n \times n$ -матрицу деформаций DTW
 $\text{cost} := \text{DTW}(\mathbf{c}, \mathbf{x})$;
 - 2: вычислить выравнивающий путь по матрице деформаций
 $\text{alignment} := \text{DTWpath}(\text{cost})$;
-

В качестве алгоритма метрического обучения в данной работе был выбран алгоритм LMNN (Weinberger: 2009). Данный алгоритм сочетает в себе идеи метода k ближайших соседей. Первая идея заключается в минимизации расстояний между k ближайшими объектами, находящимися в одном классе:

$$Q_1(\mathbf{L}) = \sum_{j \rightsquigarrow i} \|\mathbf{L}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)\|^2 \rightarrow \min_{\mathbf{L}},$$

где $j \rightsquigarrow i$ означает, что \mathbf{x}_j является одним из k ближайших соседей для \mathbf{x}_i . Вторая идея состоит в максимизации расстояния между каждым объектом и его объектами-нарушителями. Объектом-нарушителем для \mathbf{x}_i назовем объект \mathbf{x}_l такой, что

$$\|\mathbf{L}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_l)\|^2 \leq \|\mathbf{L}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)\|^2 + 1, \quad \text{где } j \rightsquigarrow i. \quad (54)$$

Таким образом, необходимо минимизировать следующий функционал:

$$Q_2(\mathbf{L}) = \sum_{j \rightsquigarrow i} \sum_l (1 - y_{il}) [1 + \|\mathbf{L}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)\|^2 - \|\mathbf{L}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_l)\|^2]_+ \rightarrow \min_{\mathbf{L}},$$

где $y_{il} = 1$, если $y_i = y_l$, и $y_{il} = 0$ в противном случае. Положительная срезка позволяет штрафовать только те объекты, которые удовлетворяют условию (54).

Задача метрического обучения состоит в нахождении линейного преобразования $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{L}\mathbf{x}$, то есть нахождении матрицы \mathbf{L} в виде решения оптимизационной

задачи

$$Q(\mathbf{L}) = \mu Q_1(\mathbf{L}) + (1 - \mu) Q_2(\mathbf{L}) \rightarrow \min_{\mathbf{L}}, \quad (55)$$

где $\mu \in (0, 1)$ — весовой параметр, определяющий вклад каждого из функционалов.

Пусть $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$ — неразмеченный временной ряд. Выравниваем временной ряд \mathbf{x} относительно всех центроидов классов

$$\hat{\mathbf{x}}_e = G(\mathbf{x}, \mathbf{c}_e), \quad \text{где } e \in \{1, \dots, K\}.$$

Отнесем временной ряд к классу, для которого минимально расстояние до соответствующего центроида. В качестве расстояния используем обученную метрику Махаланобиса с фиксированной матрицей \mathbf{A}

$$\hat{y} = \arg \min_{e \in \mathbb{Y}} d_{\mathbf{A}}(\hat{\mathbf{x}}_e, \mathbf{c}_e).$$

В **главе 6** ставится задача порождения информативного признакового пространства. Временные ряды акселерометра образуют множество \mathcal{S} сегментов \mathbf{s} фиксированной длины T :

$$\mathbf{s} = [x_1, \dots, x_T]^T \in \mathbb{R}^T.$$

Необходимо построить модель классификации $f : \mathbb{R}^T \rightarrow Y$, которая будет ставить в соответствие каждому сегменту из множества \mathcal{S} метку класса из конечного множества Y . Обозначим за

$$\mathcal{D} = \{(\mathbf{s}_i, y_i)\}_{i=1}^m \quad (56)$$

исходную выборку, где $\mathbf{s}_i \in \mathcal{S}$ и $y_i = f(\mathbf{s}_i) \in Y$.

Авторы предлагают построить модель f в виде суперпозиции $f = f(\mathbf{g})$. Функция $\mathbf{g} : \mathbb{R}^T \rightarrow \mathbb{R}^n$ является отображением из пространства \mathbb{R}^T в признаковое пространство $\mathbb{G} \subset \mathbb{R}^n$. Имея функцию порождения признаков \mathbf{g} , преобразуем исходную выборку (56) в

$$\mathcal{D}_{\mathbb{G}} = \{(\mathbf{g}_i, y_i)\}_{i=1}^m,$$

где $\mathbf{g}_i = \mathbf{g}(\mathbf{s}_i) \in \mathbb{G}$.

Модель классификации $f = f(\mathbf{g}, \boldsymbol{\theta})$ является параметрической функцией с вектором параметров $\boldsymbol{\theta}$. Оптимальные параметры $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ определяются оптимизацией функции ошибки классификации

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}} L(\boldsymbol{\theta}, \mathcal{D}_{\mathbb{G}}, \boldsymbol{\mu}). \quad (57)$$

Вектор $\boldsymbol{\mu}$ является внешним параметром для заданной модели классификации. Примеры таких параметров и функций ошибки для различных моделей классификации приведены ниже.

Чтобы сравнить качество классификации с прошлыми результатами (Karasikov: 2016, Ivkin: 2015), в качестве метрики качества используется точность классификации:

$$\text{accuracy} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[f(\mathbf{g}(\mathbf{s}_i), \hat{\boldsymbol{\theta}}) = y_i \right]. \quad (58)$$

Модели порождения признакового пространства для временных рядов.

Экспертные функции. В качестве базового подхода будем использовать экспертные функции как функции порождения признаков. Экспертные функции — это некоторые статистики g_j , где $g_j : \mathbb{R}^T \rightarrow \mathbb{R}$. Признаковым описанием $\mathbf{g}(\mathbf{s})$ объекта s являются значения заданных экспертных статистик для данного объекта

$$\mathbf{g}(\mathbf{s}) = [g_1(\mathbf{s}), \dots, g_n(\mathbf{s})]^\top.$$

В работе (Kwapisz: 2011) авторы предлагают использовать экспертные функции, приведенные в таблице 2. Такая процедура порождения признаков генерирует признаковое описание временного ряда $\mathbf{g}(\mathbf{s}) \in \mathbb{R}^{40}$.

Таблица 2: Примеры экспертных порождающих функций

Function description	Formula
Mean	$\bar{x} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x_t$
Standard deviation	$\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (x_t - \bar{x})^2}$
Mean absolute deviation	$\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x_t - \bar{x} $
Distribution	Histogram values with 10 bins

Авторегрессионная модель. Авторегрессионная модель (Lukashin: 2003) порядка n использует параметрическую модель для аппроксимации временного ряда \mathbf{s} . Каждое значение временного ряда приближается линейной комбинацией предыдущих $n - 1$ значений

$$x_t = w_0 + \sum_{j=1}^{n-1} w_j x_{t-j} + \varepsilon_t,$$

где ε_t — регрессионные остатки. Оптимальные параметры $\hat{\mathbf{w}}$ авторегрессионной модели используются как признаки $\mathbf{g}(\mathbf{s})$. Данные параметры минимизируют квадратичную ошибку аппроксимации временного ряда и предсказания модели

$$\mathbf{g}(\mathbf{s}) = \hat{\mathbf{w}} = \arg \min_{\mathbf{w} \in \mathbb{R}^n} \left(\sum_{t=n}^T \|x_t - \hat{x}_t\|^2 \right). \quad (59)$$

Задача (59) эквивалентна задаче линейной регрессии.

Анализ сингулярного спектра. Альтернативной гипотезой порождения признакового пространства для временного ряда является анализ сингулярного спектра (Singular Spectrum Analysis, SSA) (Hassani: 2007). Для каждого временного ряда \mathbf{s} из исходной выборки \mathcal{D} строится траекторная матрица:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ x_2 & x_3 & \dots & x_{n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{T-n+1} & x_{T-n+2} & \dots & x_T \end{pmatrix}.$$

Здесь ширина окна n является внешним структурным параметром. Сингулярное разложение матрицы $\mathbf{X}^\top \mathbf{X}$:

$$\mathbf{X}^\top \mathbf{X} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}^\top,$$

где \mathbf{U} — унитарная матрица и $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ причём λ_i собственные значения $\mathbf{X}^\top \mathbf{X}$. Признаковое описание объекта \mathbf{s} задаётся спектром матрицы $\mathbf{X}^\top \mathbf{X}$:

$$\mathbf{g}(\mathbf{s}) = [\lambda_1, \dots, \lambda_n]^\top.$$

Spline Approximation. Предлагаемый метод аппроксимирует временные ряды с помощью сплайнов (De Boor: 1978). Сплайн определяется его параметрами: узлами и коэффициентами. Предполагается, что узлы сплайна $\{\xi_\ell\}_{\ell=0}^M$ равномерно распределены по временной оси. Кусочные модели, построенные на отрезках $[\xi_{\ell-1}; \xi_\ell]$, заданы коэффициентами $\{\mathbf{w}_\ell\}_{\ell=1}^M$. Оптимальные параметры сплайна являются решением системы с дополнительными условиями равенства производных до второго порядка включительно на концах отрезков. Обозначим каждый отрезок-сегмент $p_i(t)$ $i = 1, \dots, M$ и весь сплайн $S(t)$. Тогда система уравнений принимает вид

$$S(t) = \begin{cases} p_1(t) = w_{10} + w_{11}t + w_{12}t^2 + w_{13}t^3, & t \in [\xi_0, \xi_1], \\ p_2(t) = w_{20} + w_{21}t + w_{22}t^2 + w_{23}t^3, & t \in [\xi_1, \xi_2], \\ \dots & \dots \\ p_M(t) = w_{M0} + w_{M1}t + w_{M2}t^2 + w_{M3}t^3, & t \in [\xi_{M-1}, \xi_M], \end{cases}$$

$$\begin{aligned} S(\xi_t) &= x_t, \quad t = 0, \dots, M, \\ p'_i(\xi_i) &= p'_{i+1}(\xi_i), p''_i(\xi_i) = p''_{i+1}(\xi_i), \quad i = 1, \dots, M-1, \\ p_i(\xi_{i-1}) &= x_{i-1}, p_i(\xi_i) = x_i, \quad i = 1, \dots, M. \end{aligned}$$

Объединение всех параметров сплайна задаёт признаковое описание временного ряда:

$$\mathbf{g}(\mathbf{s}) = [\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_M]^\top.$$

ПРО ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Публикации соискателя по теме диссертации

Публикации в журналах из списка ВАК.

1. Исаченко Р. В., Стрижов В. В. Метрическое обучение в задачах мультиклассовой классификации временных рядов // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. № 2. С. 48–57.
2. Isachenko R. et al. Feature Generation for Physical Activity Classification // Artificial Intelligence and Decision Making, 2018. № 3. С. 20–27.
3. Isachenko R. V., Strijov V. V. Quadratic programming optimization with feature selection for nonlinear models // Lobachevskii Journal of Mathematics, 2018. Т. 39. № 9. С. 1179–1187.
4. Isachenko R. V., Vladimirova M. R., Strijov V. V. Dimensionality Reduction for Time Series Decoding and Forecasting Problems // DEStech Transactions on Computer Science and Engineering, 2018. №. optim.
5. Исаченко Р.В., Яушев Ф.Ю., Стрижов В.В. Модели согласования скрытого пространства в задаче прогнозирования // Системы и средства информатики, 2021. Т. 31. № 1.

Прочие публикации.

6. Исаченко Р. В., Катруца А. М. Метрическое обучение и снижение размерности пространства в задачах кластеризации // Машинное обучение и анализ данных, 2016. Т. 2. № 1. С. 17–25.